

REMARKS

Claims 9-17 are pending in the application.

By the foregoing Amendment, claims 1-8 are canceled without prejudice or disclaimer. New claims 9-17 are added. These changes are believed not to introduce new matter, and entry of the Amendment is respectfully requested.

It is noted that although the Office Action addresses only claims 1-3, claims 1-3 were amended and new claims 4-8 were added in a substitute specification submitted concurrently with the filing of this application, and amended claims 1-3 and new claims 4-8 were the claims included in the published application (No. 2006/0262306 A1). Following a telephonic inquiry to the Examiner on April 10, 2007 by Applicant's counsel Linda Shapiro (Reg. No. 28,264) regarding the status of the claims, the Examiner advised on April 11, 2007 that the Office had recognized claims 1-8, and that if Applicant wished to cancel all pending claims, all eight claims should be included.

Based on the above Amendment and the following Remarks, Applicant respectfully requests that the Examiner reconsider all outstanding rejections, and withdraw them.

Rejection under 35 U.S.C. § 112, ¶ 2

In paragraphs 2 and 3 of the Office Action, claims 1-3 were rejected under section 112, second paragraph, for indefiniteness and improper language and form. These rejections are believed to be overcome by the cancellation of claims 1-3.

Rejections under 35 U.S.C. § 102

In paragraph 5 of the Office Action, claim 1 was rejected under section 102(b) as being anticipated by Staib et al. This rejection is overcome by the cancellation of claim 1. To the extent the Examiner may consider this rejection to be applicable to new claim 9 and claims 10-17 depending therefrom, it is respectfully traversed as being based upon a reference that does not teach or suggest the claimed invention.

Staib describes an apparatus and method for imaging on a detector a particle beam composed of charged particles having a distinct energy distribution and a distinct angle distribution; and a spectrometer, especially for electron diffraction measurements, with energy and angle resolution. When irradiating a material sample with electromagnetic radiation or charged particles, interaction processes in the sample may result in radiation of charged particles, whose spatial (or angular) and energy distribution allow conclusions to be drawn concerning physical or chemical processes in the interaction or concerning characteristics of the relevant particle types or the interaction region. Numerous analysis methods have been developed on this basis, e.g., using electron diffraction examination or spectroscopic examination. Staib points out that a problem with the known analysis methods is the simultaneous recording of angular and energy distribution of a particle beam (e.g., consisting of electrons, ions or clusters of ions, atoms or clusters of atoms).

Staib describes an improved solution for the angle and energy-resolving imaging of a particle beam, which is characterized by increased imaging quality, in particular by extended scattering light images and/or higher resolution of the images. Staib also describes a correspondingly designed spectrometer and method for its operation and use.

A first important aspect of Staib's invention is the provision of an imaging device for energy and angle-selective imaging of charged particles, e.g., electrons, with a preceding entrance aperture or a preceding entrance grid oriented transversely to the particle beam. The entrance grid is electrically insulated with respect to the deflection unit and is preferably at ground potential. It serves to limit the electric field caused by the deflection unit on the sample side and allows better edge beam control. Edge beam control means that the linearity of the relationship between scattering angles and distances between the parallelized particle trajectories is assured even in case of larger scattering angles up to the image edges.

In contrast, the invention as recited in claim 9 relates to apparatus for inspecting masks used in microlithography, which are disposed in a vacuum chamber. The present invention uses Extreme Ultraviolet (EUV) radiation, not electron radiation as in the case of Staib. To this end, the apparatus as recited in claim 9 includes: (1) illuminating means for illuminating the mask with extreme ultraviolet light; (2) converter means for converting an image in extreme ultraviolet radiation emitted by the mask into an image in radiation of a longer wavelength; (3) sensor means being disposed outside the vacuum chamber, and (4) an optical interface from the vacuum chamber to the sensor.

In a first embodiment (claim 11), the converter means forms the optical interface from the vacuum chamber to the sensor. In a second embodiment (claim 12), imaging optic means are disposed in front of the sensor means, wherein at least a part of the imaging optic means forms the optical interface from the vacuum chamber to the sensor means.

The Office Action characterizes Staib as providing an arrangement for inspecting objects, including lithographic masks. It is respectfully submitted that this characterization is not correct.

Rather, Staib's apparatus serves solely for imaging a particle beam from a point source on a detection unit, to determine the angular distribution of the particles. For this purpose, Staib provides for a deflection unit (120) and at least one deceleration lens (121-124).

In the present invention, with reference to application Figures 1 and 2, a mask intended for irradiation with EUV is examined using EUV radiation. This can necessarily take place only in a vacuum chamber. The object field OF illuminated using an EUV source of light LQ via illuminating optics EUVBO is reproduced on a converter (for example, a scintillator S) by means of EUV optics EUVO. The scintillator converts the image of the EUV wavelength range into an image in the long-wave range, which is then reproduced on the sensor using an image lens O (e.g., a microlens).

While in the present invention, the converter (for example, a scintillator) converts the image of the EUV wavelength range into an image in the long-wave range, in Staib's apparatus, the fluorescent screen (141) only shows the points of incidence of the electrons as briefly illuminating light points. Staib's fluorescent screen does not function to convert the image as required by claim 9.

Both Staib's apparatus and the present invention use a vacuum chamber; however, the structures are otherwise entirely different. While in the present invention, the source of radiation, the mask, the converter (scintillator), and at least part of the imaging optics are disposed in the vacuum chamber, in the case of Staib's apparatus the vacuum chamber only contains devices for deflection (120), deceleration (121-124), and filtering (130), and also the fluorescent screen (140). Staib does not teach or suggest disposing a source of radiation, a mask, a converter (scintillator), and at least part of the imaging optics in the vacuum chamber.

Finally, Staib's apparatus relates to a completely different field, and is not suitable for lithographic applications. Although electron beams have been used in lithography in the past, the accuracy achievable with them is not anywhere near sufficient, as can be seen from the article "Radiation sources for EUV lithography" submitted herewith as Attachment A.

In view of the foregoing, it is respectfully submitted that the invention as recited in claims 9-17 is not anticipated by Staib, and the rejection should be withdrawn.

Rejections under 35 U.S.C. § 103

In paragraph 7 of the Office Action, claims 2 and 3 were rejected under section 103(a) as being unpatentable over Staib et al. in view of Cullman et al. To the extent the Examiner may consider this rejection to be applicable to new dependent claim 14 (which recites that the imaging optic means includes a cement-free hybrid lens having at least one diffractive optical element), and to new dependent claim 15 (which recites that the imaging optic means includes a first lens group having a positive refraction power and a second lens group having a negative refraction power, that the second lens group is arranged downstream from the first lens group, and that the diffractive optical element is contained in the first lens group), it is respectfully traversed as being based upon a combination of references that does not teach or suggest the claimed invention.

In the Office Action, it was acknowledged that Staib does not disclose the imaging optics being a hybrid lens or an array of lenses; and Cullman was cited as providing these teachings. Cullman describes an apparatus and a method for photolithographic exposure of a substrate including an illumination source for providing light for producing an image of a pattern on the substrate, a lens

assembly for projecting the light onto the substrate, and an actuator. Cullman does not remedy the deficiencies of Staib with respect to the limitations of claim 9, from which claims 14 and 15 depend; that is, Cullman, like Staib, does not teach or suggest either:

- the sensor being disposed outside the vacuum chamber or
- the converter or at least part of imaging optic means being arranged as a vacuum window and functioning as an optical interface from the vacuum chamber to the sensor

Therefore, Staib in combination with Cullman cannot teach or suggest the invention as recited in claim 9, much less dependent claims 14 and 15.

In view of the foregoing, it is respectfully submitted that the invention as recited in claims 14 and 15 depending from claim 9 would not have been obvious in view of Staib and Cullman, and that the rejection should be withdrawn.

Conclusion

All rejections have been complied with, properly traversed, or rendered moot. Thus, it now appears that the application is in condition for allowance. Should any questions arise, the Examiner is invited to call the undersigned representative so that this case may receive an early Notice of Allowance.

Favorable consideration and allowance are earnestly solicited.

Respectfully submitted,

JACOBSON HOLMAN PLLC

Date: April 23, 2007

By: 

Customer No. 00,136
400 Seventh Street, N.W.
Washington, D.C. 20004
(202) 638-6666

Allen S. Melser
Registration No. 27,215

Attachments: **A – “Strahlungsquellen für die EUV-Lithographie”**
 B – translation of A (“Radiation sources for EUV lithography”)
 Petition for extension of time
 Credit card payment form



PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of:

Hans-Juergen DOBSCHAL

Application No. 10/554,048

Filed: October 24, 2005

For: ARRANGEMENT FOR INSPECTING
OBJECTS, ESPECIALLY MASKS IN
MICROLITHOGRAPHY

Confirmation No. 8295

TC/Art Unit: 2884

Examiner: Fani Polyzos Boosalis

Atty Docket: P70853US0

ATTACHMENT A

Strahlungsquellen für die EUV-Lithographie

Lithographie mit extrem ultravioletter Strahlung wird voraussichtlich 2007 die optische Lithographie fortsetzen.

Uwe Stamm, Heinrich Schwoerer und Rainer Lebert

Lithographie mit extrem ultravioletter (EUV) Strahlung bei einer Wellenlänge von 13 nm ist nach der „Roadmap“ der Halbleiterhersteller die Technologie der Wahl für die Chipfertigung ab 2007. Dieser Technologiesprung erfordert nicht nur Optiken und Masken mit einer Genauigkeit im Sub-Nanometer-Bereich, sondern auch äußerst leistungsfähige EUV-Strahlungsquellen. Laser- und entladungserzeugte Plasmen sind dafür die aussichtsreichen Kandidaten.

Seit 1959 setzt die Halbleiterindustrie auf Miniaturisierung und Geschwindigkeit. Das Ergebnis: Ein gängiger PC bewältigt heute die Rechenleistung einer raumfüllenden Großrechenanlage von 1980. In der Vergangenheit hat sich alle ein bis anderthalb Jahre die Zahl der Transistoren pro Chip verdoppelt – ein Trend, den der spätere INTEL-Mitbegründer Gordon Moore bereits 1965 erkannt hat und der noch immer als Mooresches Gesetz die Halbleiterindustrie beherrscht. Und die Chiphersteller planen auch für die nächsten 10–15 Jahre diesem Gesetz zu folgen.

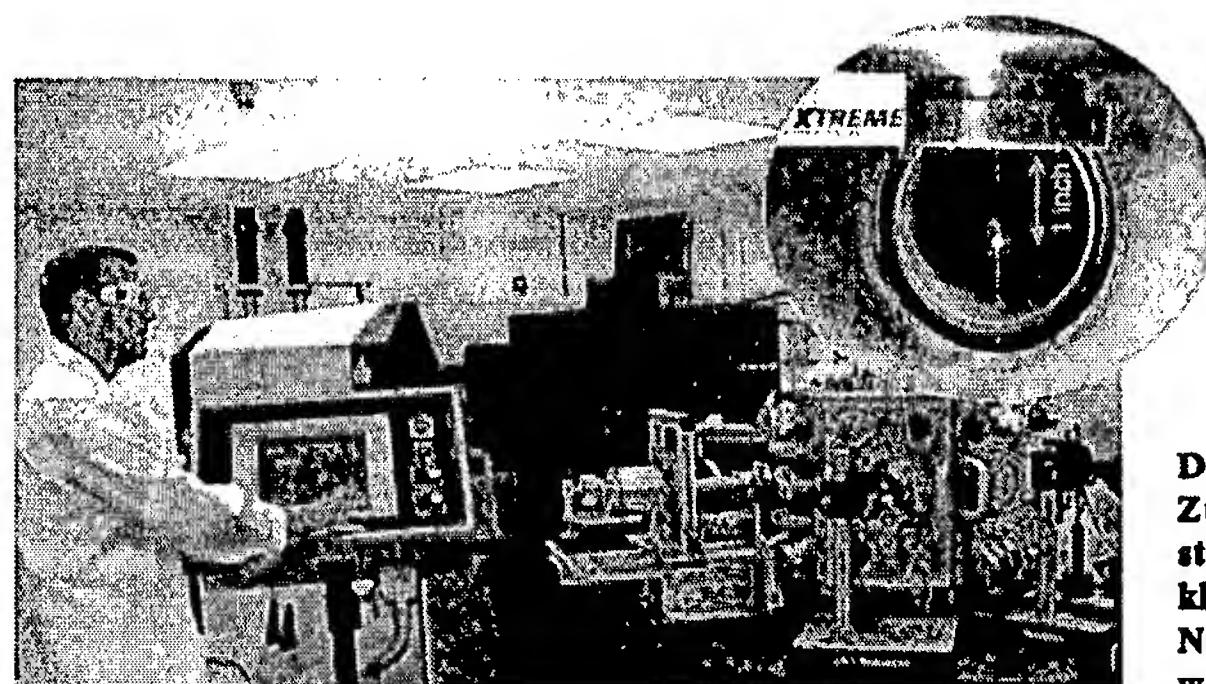
Heute definieren nur noch wenige Tausend Elektronen den Schaltzustand eines Bits und ebenso wenig Atome liegen innerhalb der Sperrschicht eines Transistors. In führenden Labors der Welt werden bereits Transistoren mit Strukturen von nur noch 10 Nanometern Größe betrieben, die wie ihre „großen Brüder“ funktionieren.

Zur Erzeugung ultrafeiner Strukturen werden heute in der Massenfertigung photolithographische Verfahren angewendet. Damit lassen sich Auflösungen erzielen, die jenseits derjenigen von klassischen Mikroskopen liegen. Die physikalischen Grenzen der Miniaturisierung sind somit bereits zu erahnen, aber definitiv noch nicht erreicht. Da die Photolithographie ein optisches Verfahren ist, hängt die erreichbare laterale Auflösung Δx nach der Abbéschen Formel von der Lichtwellenlänge λ und der Numerischen Apertur NA ab:

$$\Delta x = k \cdot \lambda / NA,$$

In der Halbleiterlithographie werden alle drei Wege, um immer kleinere Strukturen photolithographisch zu erzeugen, parallel beschritten:

- den so genannten k -Faktor verringern,
- die Wellenlänge des zur Abbildung verwendeten Lichtes verkleinern,
- die Numerische Apertur erhöhen.



Das Licht der Zukunft? Chipstrukturen, die kleiner als 50 Nanometer sind, werden künftig voraussichtlich mit extrem ultravioletter Strahlung hergestellt. Erzeugen lässt sie sich z. B. in einem Strahl flüssigen Xenons, das durch einen starken Laser in den Plasmazustand übergeht. (Foto: XTREME technologies)

Das klassische Auflösungskriterium ist durch $k \approx 1$ gegeben, d. h. die Intensität muss zwischen zwei aufzulösenden Objekten praktisch auf null abfallen. Seit den späten 80er Jahren wurden aber Photolacke (Resists) entwickelt, deren Kennlinie so steil ist, dass eine Abbildung als „scharf“ gilt, wenn die Intensität zwischen zwei aufzulösenden Objekten nur um wenige 10 % abfällt. Damit lassen sich heute k -Faktoren von unter 0,4 erreichen, und künftig werden voraussichtlich sogar Werte von ca. 0,3 möglich sein.

Als Lichtquelle für die Lithographie setzte man bis in die neunziger Jahre Quecksilberdampflampen (Hg i-Linie bei 365 nm) ein. Seit Mitte der 90er Jahre werden UV-Laser bei 248 nm eingesetzt, und gegenwärtig wird die 193-nm-Excimerlaserlithographie in die Chipproduktion bei Strukturbreiten von 100 nm eingeführt. Die excimerlaserbasierte Technologie hat heute einen Anteil am Lithographiemarkt von ca. 80 %. 2005 soll die 157-nm-Technologie folgen.

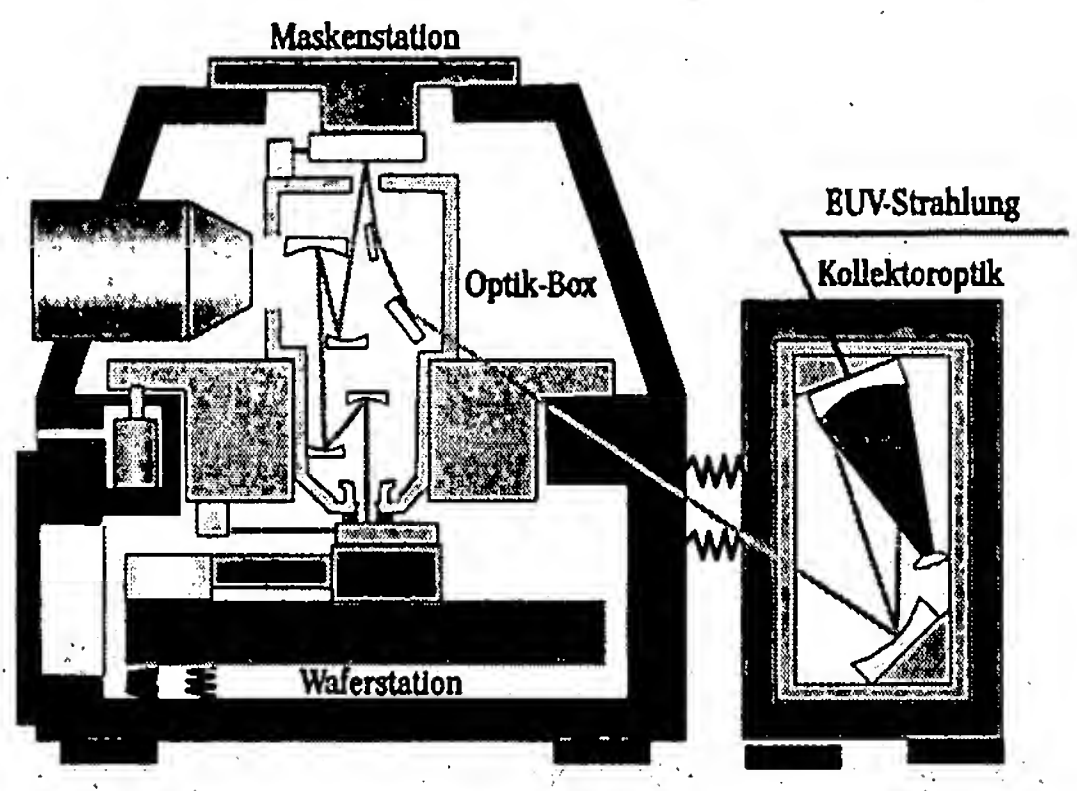
Schließlich erreichen neueste Lithographieobjektive mit komplexen asphärischen Optiken höchster Präzision NA -Werte von bis zu 0,85.

Heute deutet alles darauf hin, dass bei numerischen Aperturen von 0,9, k -Faktoren von 0,35 und Wellenlängen von 157 nm und den damit erzeugbaren minimalen Strukturbreiten von 70–50 nm die Grenze excimerlaserbasierter, lichteptischer Konzepte erreicht ist. Um noch kleinere Strukturen zu erzeugen, müssen vollständig neue Lithographietechniken entwickelt werden, die mit deutlich kürzerer Wellenlänge arbeiten. Deshalb wurden in der Vergangenheit weltweit verschiedene Techniken wie Röntgen-, Elektronenstrahl- und Ionenstrahl-Lithographie untersucht, die sich aber allesamt wohl nicht für die Massenfertigung von Schaltkreisen eignen. Bei der Röntgenlithographie besteht das unlösbare Problem in der Herstellung der

Dr. Uwe Stamm, XTREME technologies GmbH, Hans Böckler-Str. 27, 37079 Göttingen;
Dr. Heinrich Schwoerer, Institut für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena;
Dr. Rainer Lebert, AIXUV GmbH, Steinbachstraße 15, 52074 Aachen

Masken. Ionen- und Elektronenstrahlen haben aufgrund ihrer Ladung starke Coulomb-Wechselwirkung bei hohen Strömen und sind deshalb in der erreichbaren Kombination aus Auflösung und Produktivität limitiert. Gegenwärtig wird allein die Elektronenstrahl-Lithographie für die Schaltkreisherstellung ab 2007 – bei geringer Produktivität – entwickelt. Ionenstrahl- und Röntgen-Lithographie sind aus den Roadmaps der Halbleiterindustrie verschwunden.

Abb. 2:
Schema eines EUV-Belichters. Die EUV-Strahlung wird über eine Kollektoroptik in den eigentlichen Scanner eingekoppelt. Dort bildet sie die reflektive Maske über ebenfalls reflektive optische Elemente auf den Wafer ab.



Anforderungen an EUV-Lithographie

Zur künftigen Herstellung von Schaltkreisen mit kritischen Dimensionen („Knoten“) von 50 nm und darunter ist aus Sicht der internationalen Experten die Extrem-Ultraviolett-Lithographie (EUVL) der vielversprechendste Ansatz [1]. Die zur Belichtung der Wafer vorgesehene EUV-Strahlung (manchmal auch mit XUV bezeichnet) liegt im Spektralbereich zwischen Ultraviolett- und weicher Röntgenstrahlung (etwa 1 nm bis 100 nm Wellenlänge). Für die Lithographie konzentrieren sich die Arbeiten auf das Gebiet um 13,5 nm, weil sich nur hier effiziente Optiken für die erforderlichen Belichtungssysteme herstellen lassen.

Die technischen Herausforderungen für die EUVL sind enorm: Zum einen stellen die angepeilten Dimensionen von 50 nm oder weniger immense Anforderun-

gen an die mechanisch-optische Auslegung und Stabilität des EUV-Belichters (Scanners) (Abb. 2). Im EUV-Scanner müssen Maske und Wafer bei Verfahrensgeschwindigkeiten von Masken- und Waferaufnahme im Bereich von 0,5 bis 2,0 m/s auf Nanometer genau positioniert werden. Man stelle sich vor: Ein ICE solle bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h auf 0,2 mm exakt seiner vorgegebenen Fahrstrecke folgen!

Zum anderen wird EUV-Strahlung – im Unterschied zur UV-Strahlung – in nahezu allen Materialien sehr stark absorbiert. So liegt die Absorptionslänge in Luft bei Normaldruck dabei weit unter einem Millimeter. Damit kann sich EUV-Strahlung nur im Vakuum über die für die EUVL notwendigen Entfernungen nahezu verlustfrei ausbreiten (in den damit verbundenen experimentellen Schwierigkeiten gründet sich letztlich die etwas stiefmütterliche Behandlung der EUV-Spektroskopie in den letzten fünfzig Jahren). Für EUVL folgt aus der hohen Absorption eine folgenreiche Umstellung der Lithographietechnologie: Der gesamte Strahlengang (d. h. die Optiken, Masken, Wafer und Scanning Stages im EUV-Belichter) müssen sich im UHV befinden.

Doch damit nicht genug: Wegen der starken Absorption stehen auch keine optischen Elemente mehr zu Verfügung, die auf Transmission beruhen, um die Masken zu belichten bzw. auf den Wafer abzubilden. Dafür müssen nun reflektive Optiken, also Spiegel, eingesetzt werden. Ebenso ist die Maske selbst im Unterschied zur heutigen Lithographie reflektiv und nicht mehr transmittiv. Die Anforderungen an die Oberflächen-einheit und Formtreue erhöhen sich damit enorm. Ein Vergleich: EUV-Spiegel im Belichter haben einen Durchmesser von einigen 10 cm. Nimmt man die Nord-Süd-Ausdehnung der Bundesrepublik Deutschland von ca. 1000 km, dürfte bei gleicher Ebenheitsanforderung der höchste Berg nicht Zugspitzenhöhe haben, sondern weniger als 0,5 cm hoch sein.

Der notwendige Einsatz reflektiver Optiken legt die nutzbare Wellenlänge für die EUV-Lithographie mehr oder weniger fest: Hohe Reflektivitäten von Spiegeln unter nahezu senkrechtem Einfall sind im EUV derzeit

Anforderungen an die EUV-Lithographie-Quellen

Strahlungsleistung

Bei den wahrscheinlich erreichbaren Empfindlichkeiten der EUV-Resists sowie den erheblichen Verlusten im Beleuchtungssystem der Maske und im Abbildungssystem von der Maske auf den Wafer wird am Eingang des EUV-Scanners eine mittlere EUV-Leistung von 80–120 W im Zwischenfokus benötigt [4]. Eine Kollektoroptik zwischen Plasma und Scanner wird das strahlende Plasma in diesen Fokus abbilden. Berücksichtigt man die Reflektivitäten und geometrisch-optischen Transmission der Kollektoroptik-Elemente ergibt sich – für eine Leistung von 80 W im Zwischenfokus – eine direkt vom Plasma in einen Raumwinkel von 2π emittierte Leistung

von 1111 W! Dies liegt fast zwei Größenordnungen über den in der Excimerlaserslithographie verwendeten Laserleistungen.

Emittierende Quellengröße

Aus den optischen Eigenschaften des EUV-Belichtungssystems ergeben sich direkt die Anforderungen an Quellengröße und Divergenz der Strahlung. Die bestimmende Größe ist die so genannte *Étendue*, das Produkt aus der Fläche des Beleuchtungsflecks und dem Quadrat der numerischen Apertur

$$E = A_{\text{eff}} \pi (NA)^2,$$

die für das optische System konstant ist. Aus der konzipierten Größe des Beleuchtungsflecks von 2×20 mm und der numerischen Aper-

tur des Abbildungsobjektivs von 0,25 kann nur Licht der Quelle genutzt werden, das einer *Étendue* von $1-2 \text{ mm}^2 \text{ sr}$ entspricht. Bei den in Rede stehenden Öffnungswinkeln der Kollektoroptik für die Quelle von ca. 2 sr kann das optische System des EUV-Scanners Strahlung nur aus einem Quellenvolumen mit einem Durchmesser von ca. 1 mm übertragen. In diesem winzigen Volumen muss die gesamte Leistung von mehr als 1000 W in $2\pi \text{ sr}$ erzeugt werden!

Räumliche und zeitliche Stabilität der Emission

Um reproduzierbar Strukturen im Bereich von 50 nm und darunter erzeugen zu können, muss die Dosis der EUV-Belichtung auf etwa

0,1 % konstant gehalten werden. Damit ergibt sich die geforderte Energiestabilität der gepulsten Emission in den erfassten Raumwinkel zu ca. 1 % Standardabweichung. Die räumliche Lage des emittierenden Plasmas muss auf etwa 0,1 mm stabil sein.

Optiklebensdauer

Als Lebensdauer der EUV-Belichteroptiken werden heute 1 Jahr (3000 Betriebsstunden) für die erste Kollektoroptik (siehe Abb. 2) bzw. 10 Jahre (30000 Betriebsstunden) für die weiteren Scanneroptiken gefordert. Vor allem aufgrund von Debris ist man von einer Lebensdauer von einem Jahr heute noch mehr als drei Größenordnungen entfernt.

nur mit dielektrischen Spiegeln aus Vielschichten (Multilayer-Spiegel) zu erreichen, und auch nur für Wellenlängen um 11 nm und um 13,5 nm. Spiegel für den Spektralbereich um 11 nm lassen sich aus abwechselnden Beryllium- und Silizium-Schichten herstellen. Allerdings wird sich Beryllium aufgrund der Gesundheitsgefährdung voraussichtlich nicht durchsetzen. Damit bleiben als zweiter technischer Ansatz Schichtsysteme aus Molybdän und Silizium mit einem Reflexionsmaximum um 13,5 nm. Für die Massenproduktion geht man von einer Reflektivität des einzelnen Spiegels von „nur“ 65 % aus – auch wenn sich bei Rekordversuchen etwas über 70 % erreichen lässt. Da die Optiken im EUV-Scanner aus 12 oder mehr solcher Spiegel bestehen werden, kommt in der Waferebene allein aufgrund der Reflektivität nur noch ca. $5,6 \cdot 10^{-3}$ der EUV-Leistung an, die in die Beleuchtungsoptik eintritt.

Für die EUV-Lithographie sind deshalb leistungsstarke Strahlungsquellen gefragt, die die Verluste in der Optik kompensieren. Welche Quellen kommen dafür in Frage? Naheliegender wäre ein Laser im weichen Röntgengebiet. Ein effizienter, verlässlicher Röntgenlaser ist jedoch trotz vielfältiger Versuche nicht in Sicht.

Ebenfalls naheliegend scheint, die Emission relativistischer Elektronenstrahlen an Beschleunigern zu nutzen (z.B. Speicherring BESSY II). Allerdings ist die Strahlungsleistung klassischer Systeme zu gering, sodass nur Freie-Elektronen-Laser für 13 nm die Anforderungen erfüllen könnten [2]. Diese wären aber zu unhandlich und unflexibel, um insbesondere bei den angesprochenen Leistungsanforderungen in die Fabrikationsphilosophie der Halbleiterindustrie eingeflochten zu werden.

Die dritte und heute favorisierte Möglichkeit für EUV-Strahlungsquellen ist seit vielen Jahren aus dem Labor bekannt: die Erzeugung von heißen Plasmen, die Strahlung bis in den Röntgenbereich emittieren. Dabei kann man die Plasmen entweder durch eine elektrische Entladung oder durch intensive Laserstrahlung anregen. Die Emission heißer Plasmen lässt sich über die Schwarzkörper-Strahlung abschätzen. Soll das Strahlungsmaximum bei ca. 13 nm liegen, muss das Plasma etwa 220 000 K (20 eV) heiß sein. Diese Plasmatemperatur lässt sich durch sowohl elektrische als auch Laseranregung von Materie erreichen.

Die nötige Produktivität des EUV-Lithographiebelichters wird bestimmt von den bei der Chipfertigung vertretbaren Kosten für die Belichtung eines Wafers, die wiederum von den Anschaffungs- und Betriebskosten einer kompletten Belichteranlage, den Kosten für die Maske sowie den erforderlichen Prozessschritten abhängen. Nach Analysen von SEMATECH International betragen die erwarteten Anschaffungskosten eines EUV-Lithographiescanners zur Herstellung von 50 nm-Strukturen 34 Millionen US-Dollar [3]. Damit wird ein Durchsatz im Belichter von mindestens 100 Wafers pro Stunde erforderlich.

Die sich daraus ergebenden Anforderungen an plasmabasierte Strahlungsquellen lassen sich verkürzt wie folgt zusammenfassen (vgl. Kasten „Anforderungen ...“): Die EUV-Quelle soll möglichst viel Strahlung in den von der Optik nutzbaren Spektralbereich und Raumwinkel emittieren. Dabei soll möglichst wenig elektromagnetische Strahlung anderer Wellenlänge und sog. Debris emittiert werden. Unter Debris versteht man jede Form von Teilchen aus dem Quellvolumen, die zu einer Degradation der Spiegelschichten beitra-

gen – entweder durch Belegung mit dünnen, absorbierenden Schichten oder durch Prozesse ähnlich dem Ionenstrahlätzen. Beispiele für Debris sind Target- oder Elektrodenbruchstücke, verdampftes Material oder vom Plasma emittierte Elektronen, Ionen und Atome. Um möglichst wenig Debris zu erzeugen, wird in plasmabasierten EUV-Quellen häufig Xenon als effizienter und kontaminationsarmer Emitter bei 13,5 nm eingesetzt. Schließlich soll die Lebensdauer von Verschleißteilen mindestens vergleichbar sein mit denen der Excimerlaser-Lithographiequellen.

Jede der Anforderungen für sich genommen stellt bereits eine immense technische Herausforderung für die Entwicklung der EUV-Quellen dar. Alle Anforderungen zu erfüllen und die Parameter in großindustriell nutzbaren Maschinen umzusetzen scheint fast unmöglich. Und dennoch machen erste Erfolge bei der Entwicklung von EUV-Quellen Mut, dass sich das Ziel mit EUV-emittierenden Plasmen erreichen lässt, die sich sowohl elektrisch durch eine Gasentladung als auch durch intensive Laserstrahlung anregen lassen. Beide Wege werden bei der Entwicklung von EUV-Quellen verfolgt und werden im Folgenden diskutiert.

Gasentladungsangeregte Plasmen

Die bekannteste Form der Plasmaerzeugung ist die elektrische Gasentladung z. B. als Funken oder Blitz. Diese direkteste Form der Umwandlung von elektrischer in Strahlungsenergie ist auch oft die effektivste – ein Beleg dafür sind die hohen Wirkungsgrade von Entladungslampen, bei denen ein Plasma in einem kompakten, aber kalten Gefäß strahlt. Zur Emission von EUV-Strahlung reichen allerdings die Dichten und Temperaturen herkömmlicher Gasentladungsplasmen nicht aus. Ein kaltes und dünnes Entladungsplasma lässt sich jedoch mit Magnetfeldern zu einem heißen und dichten Plasma komprimieren, dessen Emissionsmaximum um 13,5 nm liegt. Hierzu kann man die Selbstkompression eines nahezu zylindrischen Plasmas durch das azimuthale Eigenmagnetfeld des axialen Entladungsstromes selbst ausnutzen (Abb. 3). Dieser Prozess wird als „Pinch-Effekt“ und das entstehende komprimierte Plasma als Pinch-Plasma bezeichnet.

Aus der Bennett-Relation (siehe Infokasten „Der Pinch-Effekt“) lässt sich für die angestrebten Plasmatemperaturen von $kT = 30$ eV, einer mittleren Ionisation von $\langle Z \rangle = 3$ für Lithium bis $\langle Z \rangle = 10$ für Xenon sowie einer Plasmadichte von $4 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ der benötigte Strom zu 18 bis 30 kA abschätzen. Dessen Eigenmagnetfeld von 14–24 T komprimiert den Plasmazylinder auf einen Druck von 2000 bar. Die gesamte Energie in Magnetfeld, Plasma und Zuleitung beträgt dann ungefähr 5 J, sodass elektrische Anschlussleistungen von ca. 50 kW erforderlich wären. Ein stabiler Plasmazylinder der geforderten Eigenschaften würde einen Widerstand von etwa 50 mΩ haben, sodass das Plasma mit einigen 10^7 W ohmsch geheizt würde. Dadurch fiel der Strom nach rund 100 ns bereits deutlich ab, sodass das Schema nur in einer gepulsten Entladung anwendbar ist.

Die so abgeleiteten Größen wurden im Prinzip bereits realisiert. Im Rahmen der Fusionsforschung wer-

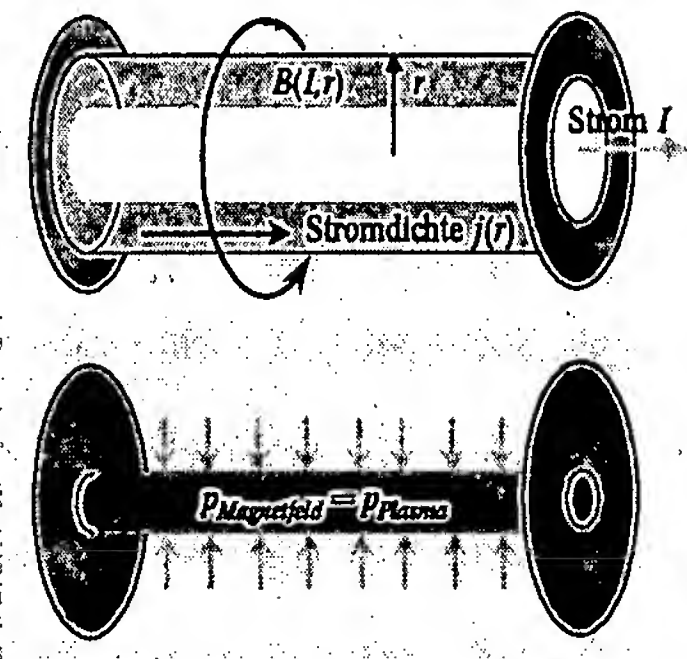


Abb. 3: Auf einen stromdurchflossenen Leiter übt das Eigenmagnetfeld eine radiale Kraft $j \times B$ aus, die einen Plasmazylinder radial komprimiert und aufheizt (Pinch-Effekt).

den Pinchplasmen im Einzelpuls sogar mit Strömen von mehreren MA betrieben und so Magnetfelder von über 1000 T und Plasmadrucke von bis zu 10^7 bar erzeugt. Das technische Problem der EUVL-Quellententwicklung besteht jedoch darin, dass das Emissionsvolumen nur etwa 1 mm^3 groß sein darf (vgl. Kasten „Anforderungen ...“). Die grundlegende physikalische Aufgabenstellung ist, den einzelnen Entladungspuls so zu gestalten, dass die Konversion von Entladungsenergie in EUV-Strahlung möglichst effizient wird. Dabei sollte das Emissionsspektrum des gegenwärtig verwendeten Xenon ebenfalls noch Möglichkeiten zur Optimierung bieten (Abb. 4). Gleiches gilt für andere Targetmaterialien: So versprechen z. B. theoretische und experimentelle Voruntersuchungen für Zinn Konversionseffizienzen bis zu $4 \text{ \%}/2\pi \text{ sr}$. Leider würde Zinn als Emittierendes das ohnehin kritische Debrisproblem noch deutlich verschärfen.

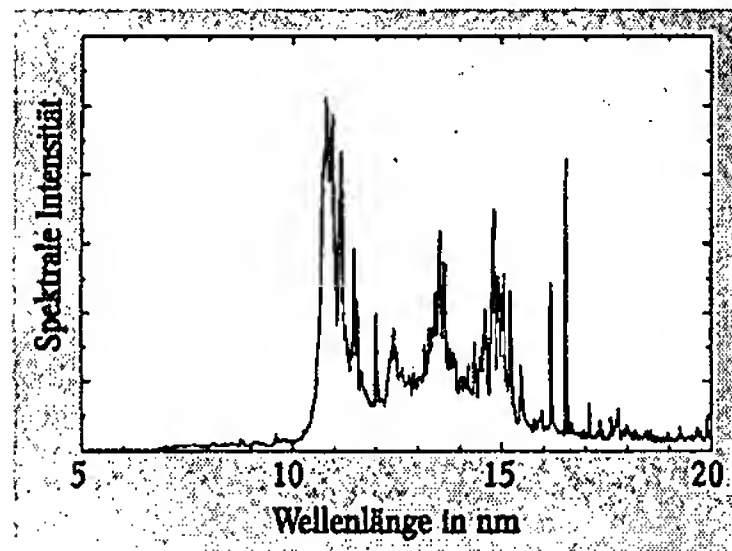


Abb. 4: Nur ein geringer Bruchteil (orange) der von Xenon im EUV emittierten Leistung kann von der EUV-Optik genutzt werden.

1) Wie es letztlich bei den erforderlichen Strahlungsleistungen von über 10 kW um die Erosion und Heizung der Targetzuführung bestellt ist, bleibt noch zu klären.

2) Mit table-top-Lasersystemen (bei Intensitäten von einigen $I_L = 10^{15} \text{ W/cm}^2$) lassen sich heute Elektronentemperaturen von über 1 MeV erzeugen.

Ob es möglich ist, die nötigen EUV-Leistungen von rund 1000 W mit gasentladungsangeregten Plasmen zu realisieren, hängt auch wesentlich von der erreichbaren Effizienz der Kühlung des Entladungssystems ab. Gute Konversionseffizienzen liegen heute bei 1 %, sodass annähernd die gesamte Anregungsleistung weggekühlt werden muss. Die technischen Lösungsansätze scheinen dies möglich zu machen. Allerdings weisen Pinchplasma-basierte EUV-Quellen ein weiteres Problem auf: Die starke Spitzenstrombelastung führt unweigerlich zur Erosion der Elektroden und begrenzt die Lebensdauer des Entladungssystems. Damit scheint eine Verschmutzung der Optik fast unvermeidlich. Es ist noch nicht absehbar, ob sich diese Probleme durch geeignete Entladungs- und Anregungsgeometrien bzw. Kontaminationsfilter beheben lassen können.

Laserangeregte Plasmen

Um das Risiko der Leistungsbegrenzung und insbesondere das Problem der Lebensdauer von Quelle und Optik bei Gasentladungsplasmen zu umgehen, werden heute alternativ laserproduzierte Plasmen als EUV-Quellen für die Lithographie untersucht und entwickelt. Hier lässt sich zumindest die Wärme ver-

gleichsweise einfach abführen. Ebenso können keine Elektroden erodieren, da keine vorhanden sind.¹⁾

Bei der Erzeugung von EUV-Strahlung durch eine Laseranregung von Plasmen wird ein vorzugsweise gepulster Laserstrahl auf ein Target fokussiert (Abb. 5). Liegen die erreichten Lichtintensitäten I oberhalb von 10^{10} – 10^{11} W/cm^2 , wird die Materie ionisiert. Das Feld eines kurzen, intensiven Laserpulses beschleunigt die freien Elektronen des Plasmas auf hohe Energien. Die mittlere kinetische Energie U_{osz} der im Lichtfeld oszillierenden Elektronen ist

$$U_{\text{osz}} = e^2 E_0^2 / (m_e \omega^2),$$

wobei $E_0 = (2I/c\epsilon_0)^{1/2}$ die elektrische Feldstärke, e die Elementarladung, ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante, m_e die Elektronenmasse und ω die Lichtfrequenz ist.

Das von der Vorderfront des Laserpulses oder von kleinen Vorpulsen gebildete Plasma expandiert und bildet einen Dichtegradienten vor der Materie, sodass der Hauptteil des Laserpulses mit Plasma und nicht mit dem ursprünglichen Festkörper in Wechselwirkung tritt. Insbesondere kann Licht nur bis zur so genannten kritischen Plasmadichte $n_{\text{krit}} = \omega^2 m_e \epsilon_0 / e^2$ – bei der die Lichtfrequenz gleich der Plasmafrequenz ist – in dieses eindringen; bei höheren Dichten wird die Brechzahl imaginär und das Licht reflektiert.

Durch Stöße mit den Plasmaionen heizen die Elektronen das Plasma auf eine Gleichgewichtstemperatur T_L . Für eine Laserwellenlänge von $\lambda = 800 \text{ nm}$ und einem Target mit kleinem bis mittlerem Z beträgt $T_L = 10^4$ – 10^5 K (1–10 eV) bei $I_L = 10^{13} \text{ W/cm}^2$ bzw. etwa 10^7 K (1 keV) bei $I_L = 10^{16} \text{ W/cm}^2$. Wie bei Gasentladungsplasmen bestimmt die Temperatur des Plasmas nun den Ursprung und damit auch die Wellenlänge der dominierenden Strahlung: Bei Temperaturen von einigen eV bis einigen 100 eV emittieren die Plasmaionen Linienstrahlung.²⁾ Dies ist die Quelle des für die EUV-Lithographie einzusetzenden Lichts.

Also: Problem gelöst? Leider nicht. Die physikalisch-technische Schwierigkeit der laserproduzierten Plasmen als EUV-Strahlungsquelle für die Lithographie liegt im Laser selbst begründet. Die Konversionseffizienz von Laserlicht in EUV-Strahlung ist vergleichbar mit der von Gasentladungs-basierten Quellen. Allerdings sind nach heutigem Kenntnisstand für die EUVL

Der Pinch-Effekt

Der eigentliche Entdecker, Willard H. Bennett (1903–1987), beschrieb den Pinch-Effekt als magnetische Selbstfokussierung in einem stromtragenden Plasma [5] und schätzte die erreichbare Plasmatemperatur durch eine Gleichgewichtsbedingung zwischen Magnetfelddruck und thermischen Plasmadruck ab:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} = \langle Z \rangle + 1 \cdot n_i \cdot kT$$

wobei $\langle Z \rangle = n_e/n_i$ die mittlere Ionisation (Ionisierungsgrad), n_i die Iondichte und kT die Plasmatemperatur ist. Mit dem Eigenmagnetfeld $B = \mu_0 I / (2\pi r)$ des Entladungsstroms I und

der Liniendichte $N_l = n_i \pi r^2$ ergibt sich

$$kT = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{8 \cdot \pi \cdot (\langle Z \rangle + 1) \cdot N_l}$$

Plasmen mit ähnlichen Temperaturen werden erzeugt, wenn man Entladungsstrom und Liniendichte aufeinander anpasst (Ähnlichkeitsparameter: I^2/N_l). Die Länge und der Durchmesser des emittierenden Plasmas sowie die Liniendichte selbst bestimmen die Größe der Anlage (Pulsenergie) und die Plasmadichte. Die Entladungsgeometrie wird durch den Ähnlichkeitsparameter der Entladungsphysik $U/(2\pi n_0)$ bestimmt, wobei n_0 die Neutralgasdichte vor der Entladung ist.

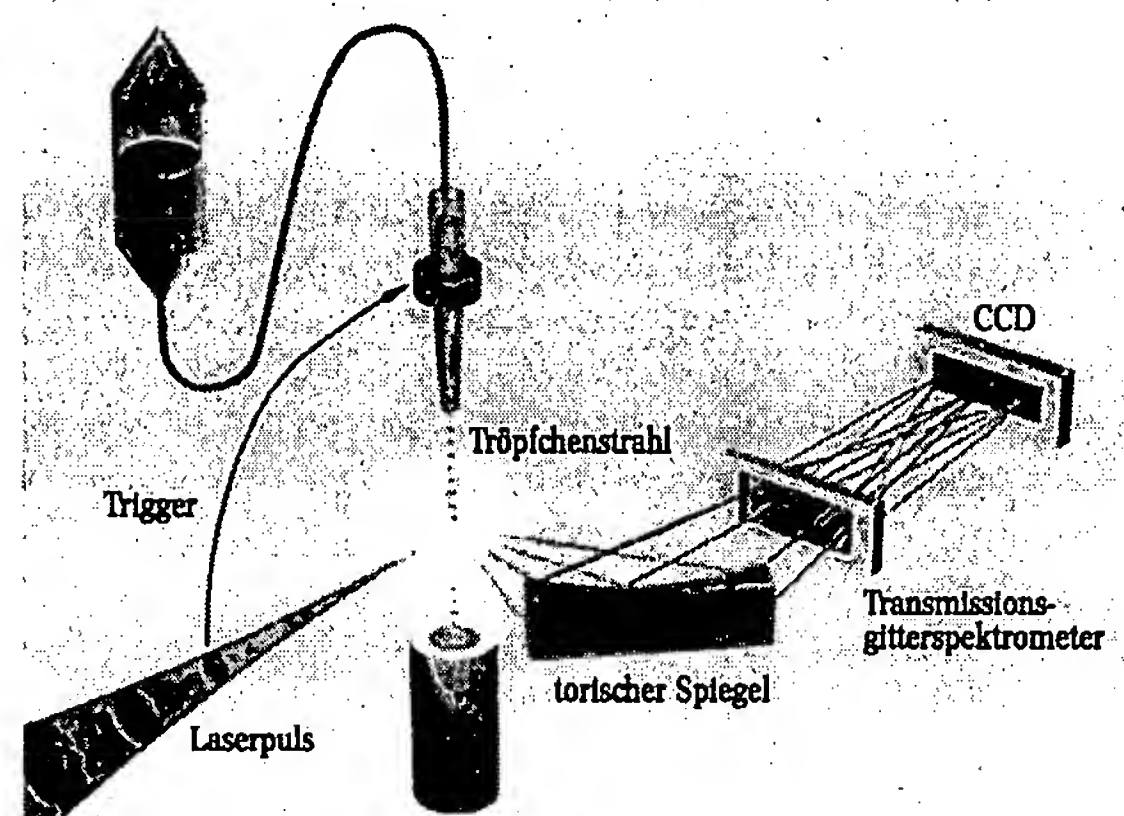


Abb. 5: Experimenteller Aufbau zur Messung der Konversionseffizienz von Laserstrahlung in EUV-Strahlung. Ein intensiver Laserpuls erzeugt ein heißes Plasma auf der Oberfläche des Wassertröpfchens. Ein kalibriertes, abbildendes Spektrometer detektiert die emittierte EUV-Strahlung.

mittlere Leistungen gepulster Laser bis zu einigen 10 kW erforderlich. Solche Laser existieren nicht – der leistungsstärkste gepulste Laser, der momentan als Prototyp entwickelt ist und für EUVL in Frage kommt, weist eine mittlere Leistung von 2,7 kW auf. Allerdings scheint die Entwicklung der erforderlichen Hochleistungslaser möglich – mit einem für die Chipfertigung entscheidenden Nachteil: Sie werden teuer, groß und sehr kompliziert. Ginge es nach der Halbleiterindustrie, würden deshalb auch gasentladungsbasierte EUV-Quellen zum Einsatz kommen – doch die technischen Risiken sind noch nicht ausgeräumt.

Um anschaulich zu machen, wie weit die Entwicklung fünf Jahre vor der Produktionseinführung ist, wird im Folgenden der experimentell erreichte Stand von gasentladungs- und lasererzeugten Plasma-EUV-Quellen beschrieben.

Gasentladungsplasmen – State of the Art

Alle zur Zeit untersuchten Entladungsquellen nutzen den Pinch-Effekt, unterscheiden sich aber erheblich in der Zündung der Entladung, die die Stabilität der EUV-Emission beeinflusst, in der Geometrie der Entladungskammer und damit in der Plasmadynamik sowie hinsichtlich des verwendeten Pulsstromgenerators. Wir beschränken uns hier auf zwei Geometrien: den Z-Pinch (Abb. 6a) [6] und den Hohlkathodengetriggerten Pinch (HCT, Abb. 6b) [7], mit denen deut-

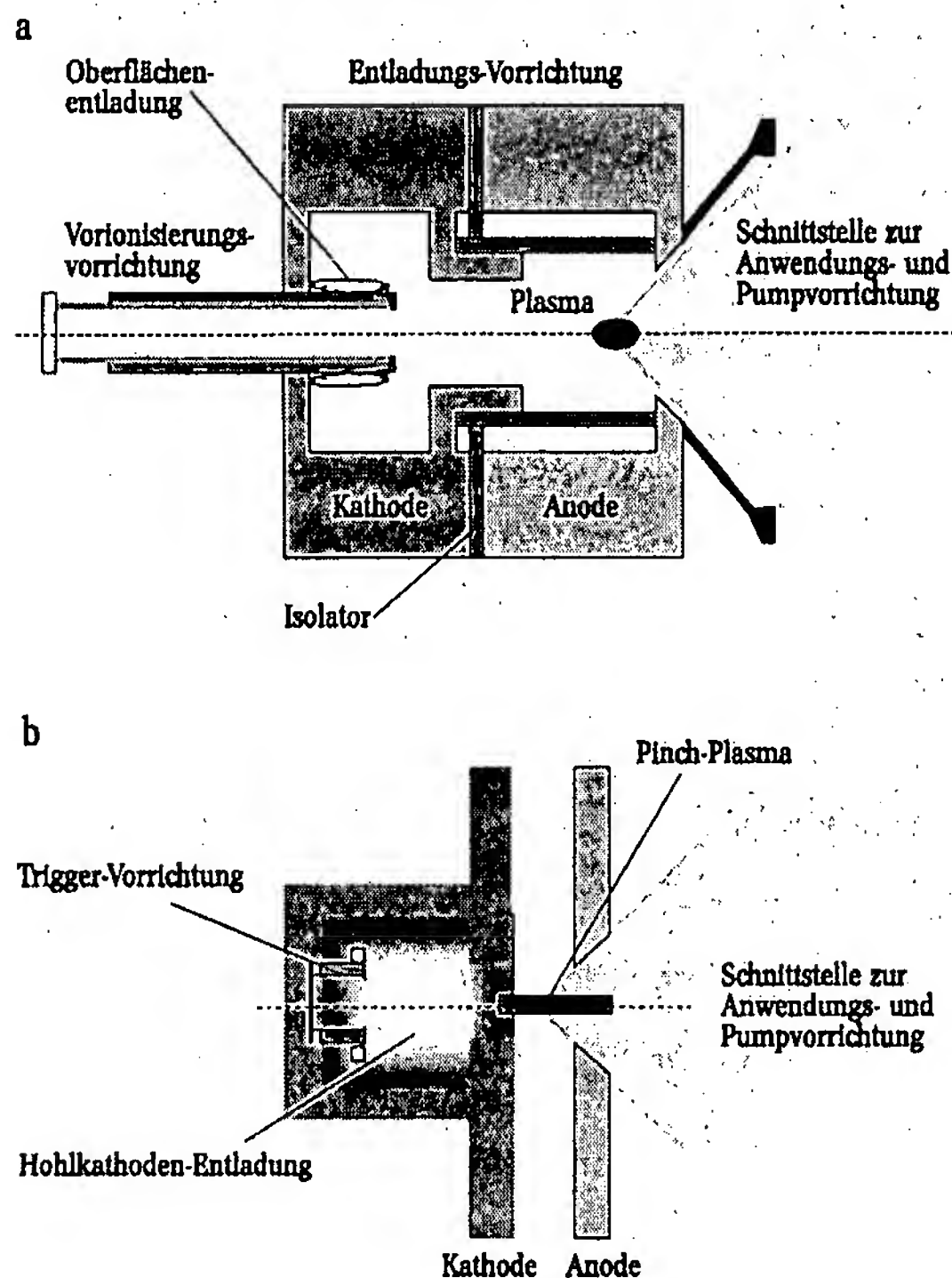


Abb. 6:

- a) Bei der Z-Pinch-Anordnung wird die Gasentladung durch einen pulsformenden Spannungsgenerator angetrieben. Die eigentliche Entladung bildet sich zwischen Kathode und Anode, zum Teil entlang des Isolators zwischen beiden Elektroden, wobei die Effizienz, Homogenität und Reproduzierbarkeit durch die UV-Strahlung aus einer hocheffizienten Oberflächen-Vorionisierungsentladung erreicht wird.
- b) Auch beim HCT-Pinch findet die eigentliche Entladung zwischen Kathode und Anode statt. Die Entladung zündet jedoch nicht auf der Oberfläche des Isolators, sondern zwischen der Hohlkathode und der Hohlanode.

sche Firmen (XTREME technologies, PHILIPS Extreme UV und AIXUV) die Entwicklung anführen.

Wie oben abgeschätzt, werden die Anlagen mit typischen Entladungsenergien von 2 bis 30 J pro Puls betrieben, sodass Maximalströme von ca. 20 bis 50 kA erreicht werden. Beide Konzepte erlauben es prinzipiell, große Raumwinkel von bis über 2 sr der Quellenemission zu nutzen und kleine Plasmavolumina anzuregen.

Was ist erreicht? Mit Z-Pinch gelang es, eine maximal emittierte Leistung von ca. 40 W zu erreichen (Abb. 7), das entspricht einer Leistung von 5 W im Zwischenfokus [8]. Das liegt nur noch etwas mehr als eine Größenordnung unter der für die EUVL-Produktion geforderten Leistung. Die Größe des Emissionsgebietes liegt dabei bei ca. 1 mm Durchmesser, d. h. die gesamte emittierte Leistung kann auch tatsächlich durch das optische System des EUV-Belichters übertragen werden.

Die signifikanteste Kenngröße zum Erreichen der erforderlichen Leistung ist die Konversionseffizienz. Die höchsten Effizienzen wurden bisher mit bis zu 0,09 % in 1 sr Raumwinkel und 2 % Bandbreite erreicht, das entspricht ca. 0,55 % Konversion in 2π sr [8].³⁾ Ermutigend ist, dass die erreichten Werte nahe bei den grob abgeschätzten liegen, es jedoch noch Faktoren gibt, die eine weitere Steigerung versprechen.

Der Weg zu hoher Ausgangsleistung führt bei vorgegebener Konversionseffizienz natürlich über die Folgefrequenz. In kurzen Pulszügen gelang es, Entladungsplasmen bisher mit Repetitionsraten von bis zu 6 kHz zu betreiben. Über einen längeren Zeitraum sind sowohl beim HCT- als auch beim Z-Pinch Repetitionsraten von einigen kHz möglich. Neben der zeitlichen Stabilität ist dabei insbesondere die räumliche Stabilität des EUV-Emissionsgebietes von Bedeutung. (Die Abweichungen beim über 200 Impulse gemittelten EUV-Emissionsgebiet eines Z-Pinch-Plasmas liegen heute bei ungefähr 5 % – schon ausreichend für die EUVL-Produktion.)

Bis zur produktionsreifen Lithographie mit gasentladungsbasierten EUV-Quellen müssen die erreichbare Ausgangsleistung sowie die durch Debris verursachte endliche Optiklebensdauer weiter erhöht werden. Bei- des kann noch zum „Showstopper“ werden!

Laserproduzierte Plasmen – State of the Art

Aufgrund der geringer eingeschätzten Probleme bei der Kühlung und der vermeintlich geringeren Debris-erzeugung wurden laserinduzierte Plasmen als EUV-Quellen für die Lithographie über mehrere Jahre favorisiert und im Rahmen eines amerikanischen Konsortiums entwickelt. Eine bei den Sandia National Laboratories entwickelte Quelle lieferte eine nutzbare EUV-Ausgangsleistung bei 13,5 nm von etwa 2 W im Zwischenfokus [9].

In den meisten Untersuchungen lasererzeugter EUV-Strahlung werden gütegeschaltete Nd:YAG-Laser eingesetzt, mit Pulsenergien von einigen 10 mJ bis einigen 100 mJ und Impulsdauern zwischen 1 und 15 ns. Die Konversionseffizienzen liegen bei Verwendung von Xenon-Targets ebenfalls bei 0,5–1 % [10]. Ein Laser bei XTREME technologies mit 230 W mittlerer Leistung liefert 0,7 W EUV-Strahlung.

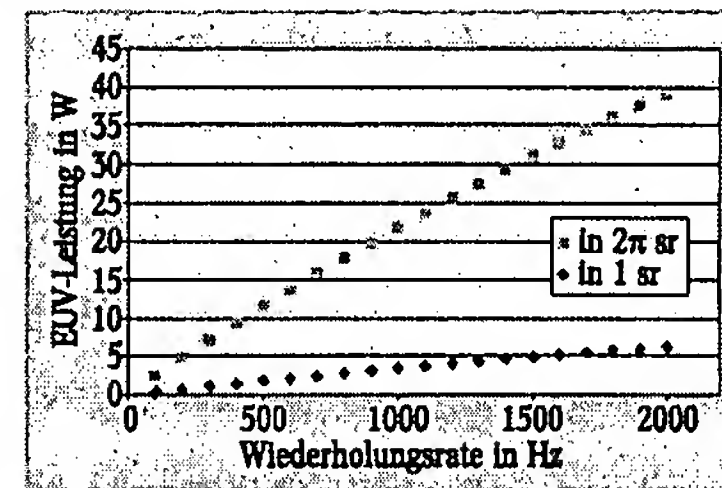


Abb. 7:

Erreichte mittlere Ausgangsleistung für eine Z-Pinch EUV-Quelle in den Labors von XTREME technologies (Göttingen), emittiert in 2π sr Raumwinkel (orange Kästchen) bzw. 1 sr (blaue Kästchen)

³⁾ Diese Konversionseffizienz ergibt sich aus dem Verhältnis von emittierter EUV-Leistung zu Eingangsleistung im elektrischen Anregungsschaltkreis.

Bei laserinduzierten Plasmen lässt sich die Debris-erzeugung minimieren, wenn alle Materie in ein Plasma verwandelt wird, also ein kleines, der Laserpuls-energie angepasstes Volumen vom Laser beschossen wird. Solche massenlimitierten Targets können entweder Flüssigkeitsstrahlen, kleine Tröpfchen oder atomare Cluster sein. Bisher liegen die erreichten Konversionseffizienzen noch deutlich unter den Werten der Festkörpertargets.

Um die derzeit höchsten Effizienzen aus massenlimitierten Targets wie im Fall von Xenon bis fast 1 % in 2π sr zu erzielen, muss die Laseranregung sorgfältig auf die Art und Größe des Targets abgestimmt werden. Die Energie des Laserpulses soll möglichst alle Materie in die gewünschte Ionisationsstufe anregen und das erzeugte Plasma auf eine Temperatur von 20–30 eV

heizen. In diesem Fall ist analog zu den Gasentladungsplasmen die Schwarzkörperstrahlung bei 13,5 nm maximal. Höhere Laserpulsenergien würden die Materie unnötig aufheizen und die Effizienz reduzieren, geringere würden nicht alle Atome in die gewünschte Ionisationsstufe und damit zur Emission anregen.

Um möglichst noch effizienter EUV-Strahlung zu erzeugen – und damit die Größe der nötigen Lasertreiber zu reduzieren – verfolgt man verschiedene Ansätze. Zum einen wird versucht, die Anregungsdauer optimal an die Dynamik des Plasmas anzupassen. Denn die Anregungsdauer hängt von der Expansionsdynamik des Plasmas ab und dessen Absorption wird stark von seiner Dichte beeinflusst: Bei Festkörpertargeten wird ein Großteil der

Strahlung an der Oberfläche reflektiert. Das meiste Licht wird in Bereichen mit der für die Laserwellenlänge kritischen Dichte absorbiert, bei noch geringeren Dichten sinkt die Absorption rasch wieder ab, der Laserpuls durchstrahlt die dünne Materie, ohne sie zu heizen. Experimente mit kleinen Wassertröpfchen zeigen, dass Laserpulsdauern um 1 ns die höchsten Konversionseffizienzen erzielen [11].

Zum anderen verspricht der Einsatz zweier kurz hintereinander applizierter Laserpulse eine Erhöhung der Konversionseffizienz. Die Aufgabe des ersten, typischerweise schwächeren Pulses ist es, ein Plasma der Dichte mit der maximalen Absorption zu erzeugen, das sich dann vom zeitlich verzögerten, starken Puls optimal heizen lässt. Auf diese Weise konnten an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena Konversionseffizienzen nahe 0,5 % in 2π sr in 0,1 % Bandbreite erreicht werden. Allerdings waren dazu Laserpulsdauern von wenigen ps aus einem Ti:Saphir-Laser nötig, die sich mit den derzeit industriell bevorzugten Nd:YAG-Lasern nicht erzeugen lassen (Abb. 8).

Viele der bisherigen systematischen Experimente zu lasererzeugter EUV-Strahlung wurden an Wassertröpfchen durchgeführt, mit denen einerseits eine hohe Konversionseffizienz innerhalb einer sehr schmalbandigen Linie erreicht wird und die andererseits einfach, billig und kontinuierlich bereitzustellen sind. Für industrielle Zwecke wird allerdings gegenwärtig aus

verschiedenen Gründen Xenon favorisiert. Xenon lässt sich unter UHV-Bedingungen aufgrund seiner Oberflächenspannung nicht zu reproduzierbaren Tröpfchen formen. Darum werden entweder Sprays, atomare Cluster oder Flüssigstrahlen eingesetzt. Aus solchen Xenonclustern und -jets werden, wie Arbeiten am Max-Born-Institut in Berlin und bei XTREME technologies in Jena zeigen, ebenfalls Effizienzen um 0,5 % erzielt. Um möglichst hohe Plasmadichten zu erzielen, sind flüssige oder gefrorene Xenon-Strahlen neben alternativen Materialien der wahrscheinlich erfolgversprechendste Ansatz.

Bezüglich der erzielten EUV-Ausgangsleistung bleiben laserinduzierte Plasmen heute bereits deutlich hinter Gasentladungsplasmen zurück. Ein Grund dafür ist vor allem die Komplexität des Laser. Es ist eben doch viel einfacher, ein gepulstes 10-kW-Hochspannungsteil anstelle eines 10-kW-Lasers zu bauen! Und auch die vermeintlich geringe Debris und damit die erhöhte Optiklebensdauer existiert bislang nur auf dem Papier. Allerdings bleiben die prinzipiellen Vorteile des Laserplasmas hinsichtlich einer effizienten Kühlung. Die weiteren Fortschritte werden mit Spannung erwartet. Denn in 2004 muss für die EUV-Lithographiequelle die Frage entschieden sein: Laserplasma oder Gasentladungsplasma?

EUVL für den industriellen Einsatz

Wenn alles so läuft, wie es sich die Experten der Halbleiterindustrie vorstellen, wird die EUV-Lithographie ab 2007 in der Fertigung von Computerchips in größerem Umfang eingesetzt. Die Anzahl der benötigten EUV-Quellen für die Belichter wird bereits 2007 etwa 100 Stück weltweit erreichen mit einem geschätzten Umsatzpotential von 200–700 Millionen Euro, je nach Quellentechnologie. Der gesamte Umsatz an weltweit

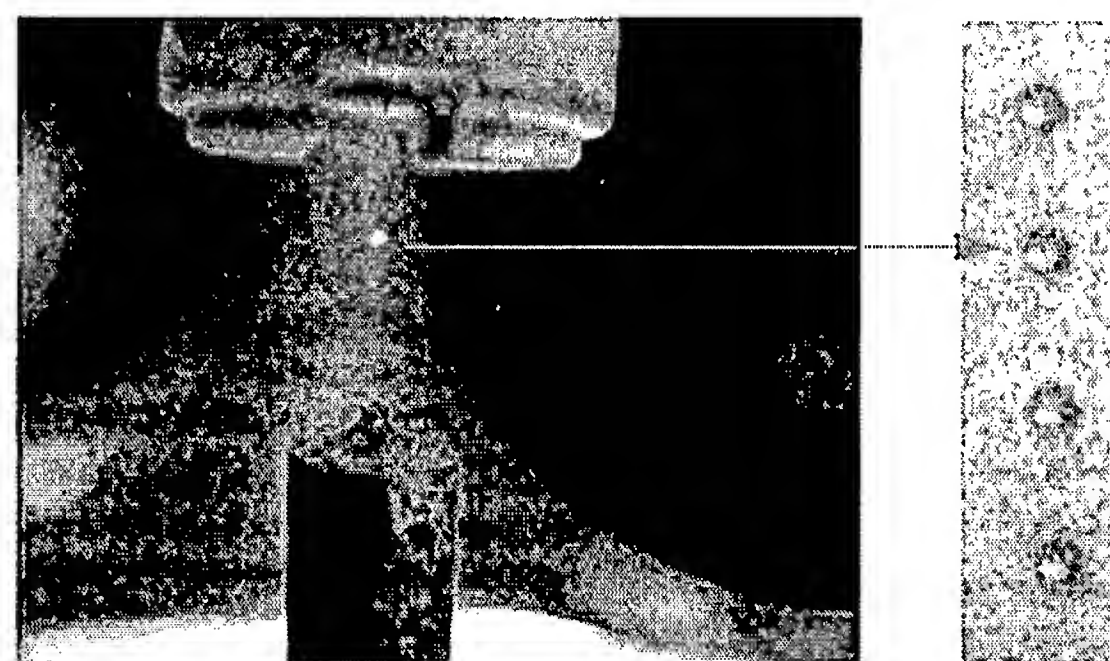


Abb. 8: Ein Laserpuls trifft genau ein Tröpfchen einer mit 1 MHz repetitierende Wassertröpfchenkette und verwandelt es in ein strahlendes Plasma. Die von einem einzelnen Tröpfchen ausgestrahlte EUV-Energie beträgt in diesen Experimenten nur einige hundert Mikrojoule. Um die für den industriellen Einsatz notwendige Durchschnittsleistung von annähernd 1 kW zu erreichen, muss also das Volumen des Wassertröpfchens und damit die Zahl der Emitter pro Laserschuss vergrößert werden, und die Repetitionsrate des Lasers sollte mehr als 10 kHz betragen.

neu installierten EUV-Belichtern wird 2007 voraussichtlich 3,5 Milliarden Euro betragen – mit steigender Tendenz.

Um in Europa gerüstet zu sein für den 13,5 nm-Wettbewerb, werden umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf europäischer und nationaler Ebene durchgeführt. Während in den 90er Jahren Machbarkeitsstudien zur EUVL vor allem in den USA

BMBF-Projekt zur EUV-Lithographie Deutsche Firmen und Institute (ohne Auftragnehmer):

- ▶ XTREME technologies GmbH
- ▶ Philips Extreme UV GmbH
- ▶ Jenoptik Mikrotechnik GmbH
- ▶ SCHOTT Glas
- ▶ Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing Technologies AG
- ▶ Schott Lithotec AG
- ▶ Roth & Rau Oberflächentechnik AG
- ▶ AIS Automation Dresden GmbH
- ▶ Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Leipzig
- ▶ Infineon Technologies AG
- ▶ Institut für Mikroelektronik Stuttgart
- ▶ Leica Microsystems Semiconductor GmbH
- ▶ Clariant GmbH

(mit Beteiligung europäischer Anwender aus der Halbleiterindustrie und Maschinenhersteller) und Japan erstellt wurden, wurden Ende der 90er Jahre in Europa verstärkte Anstrengungen unternommen, eigenständige Forschungs- und Entwicklungsprogramme ins Leben zu rufen.

In Vorbereitung umfangreicherer EUV-Forschungsaktivitäten hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2000 mit hoher Priorität eine nationale Initiative gefördert, in der nach Zielvorgaben aus der deutschen Wirtschaft an verschiedenen Forschungseinrichtungen grundlegende Fragen zu Konzepten und Grenzen der Erzeugung von EUV-Strahlung untersucht wurden. Seit 2001 fördert das BMBF mit rund 50 Millionen Euro das Verbundprojekt „Extreme Ultraviolett-Lithographie“ (siehe Kasten). Dabei kooperieren Unternehmen aus den Niederlanden, Belgien, Frankreich, Schweden und Deutschland im Rahmen einer EUREKA-Initiative, die Förderung ist auf fünf Jahre angelegt. Durch das grenzüberschreitende Projekt soll die Position der europäischen Zulieferer der Halbleiterindustrie gestärkt werden.

Eingebunden sind die deutschen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in ein gesamteuropäisches Entwicklungsprojekt zu EUV-Quellen im Rahmen des Programms MEDEA+ (Micro-Electronic Development for European Applications), das sich mit einer Kapazität von etwa 2400 Mannjahren mit der Entwicklung der EUV Lithographie befasst. Das gegenwärtige EUV-Programm in MEDEA+ hat die Entwicklung einer Komplettlösung für die erste Generation von EUV-Belichtern zum Ziel. Das Projekt zur EUV-Quellententwicklung wird von XTREME technologies geleitet.

Da nach internationaler Einschätzung bei der Umsetzung der EUVL die Strahlungsquellen vor den Masken das größte Risiko darstellen, gilt es, umfangreiche Anstrengungen zu unternehmen, um dieses Risiko zu begrenzen und zu beseitigen – was sich auch in der besonderen Beachtung dieser Fragestellung durch das BMBF erkennen lässt. In Japan wurde im April 2002 ein Programm mit einem Budget von 10 Millionen US Dollar pro Jahr für die Quellenentwicklung (Laufzeit 4 Jahre) unter dem Namen EUVA gestartet.

Mittlerweile hat Deutschland eine technologisch herausragende Position bei der Entwicklung von EUV-Quellen eingenommen. In den Jahren 2000/01 wurden drei neue Unternehmen gegründet, die sich mit der Entwicklung und Fertigung von EUV Quellen beschäftigen: die AIXUV GmbH, eine Ausgründung aus dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) und der RWTH in Aachen, die Philips Extreme UV GmbH, ein Joint Venture zwischen Philips und dem ILT, und der XTREME technologies GmbH, einem Joint Venture zwischen der Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH, Jena und der Lambda Physik AG, Göttingen.

Und die Fortschritte können sich sehen lassen: AIXUV kommerzialisiert Quellen niedriger Leistung für die Forschung an EUVL-Komponenten und hat im Oktober 2002 den weltweit ersten EUV-Belichter an Infineon ausgeliefert, bei XTREME technologies gelang es Mitte 2002, Z-Pinch-Plasma-EUV-Quellen mit der bisher weltweit höchsten verfügbaren EUV-Leistung von über 40 W zu realisieren (in etwa 2π sr bei 2 kHz). Dies ist ca. fünfmal soviel wie die von laserinduzierten Plasma-EUV-Quellen beim amerikanischen EUV LLC (Sandia National Laboratories) erzeugte Leistung. Darüber hinaus forscht und entwickelt XTREME technolo-

gies weiterhin auch auf dem Gebiet der laserinduzierten Plasmen. Philips Extreme UV kann heute aus einem HCT-Pinch-Plasma bei Repetitionsraten von mehr als 3 kHz EUV-Leistungen von 5 W mit einem Kollektor auf sammeln und die Anlage über viele Minuten betreiben. Die deutschen EUV-Quellen führen das Rennen an. Beim Zwischenstopp.

Noch ist ein weiter Weg zu gehen von den 40 W EUV Leistung heute bis zu den 1000 W Leistung für die Chipproduktion. Aber die ersten Hürden sind genommen.

Literatur

- [1] Proc. CD of SEMATECH International 5th NGL Workshop, Pasadena, USA (2001)
- [2] G. Dattoli et al., Nucl. Instr. Meth. A474/3, 259 (2001)
- [3] P. Seidel et al., Proceedings CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [4] V. Banine et al., Proc. CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [5] W. H. Bennett, Phys. Rev. 45, 890 (1934)
- [6] G. Schrieffer et al., Microelec. Eng. 61-62, 83 (2002)
- [7] R. Lebert et al., Microelec. Eng. 46, 465 (1999)
- [8] U. Stamm et al., Proc. CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [9] D. A. Tichenor et al., Proceedings of the SPIE 4688, 72 (2002)
- [10] U. Stamm et al., Proc. of the SPIE 4688, 122 (2002)
- [11] S. Dusterer et al., Appl. Opt. B Vol. 73, 693 (2001)

Die Autoren

Uwe Stamm studierte Physik in Jena und promovierte 1986 an der Friedrich-Schiller-Universität. Dort arbeitete er dann – unterbrochen von Forschungsaufenthalten in Moskau und Tokyo – als wissenschaftlicher Assistent. Von 1991 bis 2000 war er bei der Lambda Physik AG tätig. Mit Gründung der XTREME technologies GmbH übernahm Stamm 2001 deren Geschäftsführung. Er engagiert sich in verschiedenen Gremien und Arbeitskreisen u. a. von MEDEA+, VDI und BMBF.



Rainer Lebert erwarb 1984 sein Physikdiplom an der TH Darmstadt. Er promovierte 1990 an der RWTH Aachen und trug dabei wesentlich zur Realisierung von Strahlungsquellen für die Röntgenmikroskopie und Lithographie bei. Von 1994 bis 2000 leitete er die AG „Plasmatechnologie“ am Lehrstuhl für Lasertechnik. 2000 gründete Lebert mit Kollegen des Fraunhofer ILT die AIXUV

GmbH, die er seitdem als Geschäftsführer leitet. **Heinrich Schwoerer** studierte Physik in Heidelberg. Er promovierte 1994 an der ETH Zürich. Danach arbeitete er am Institut für Physikalischen Chemie der Universität Würzburg. Seit 1999 leitet er das Hochintensitätslaserslabor am Institut für Optik und Quantenelektronik der Universität Jena. Er beschäftigt sich mit der Erzeugung und Anwendung laserproduzierter Plasmen und hat dazu einen der weltweit intensivsten Laser aufgebaut.



PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of:

Hans-Juergen DOBSCHAL

Application No. 10/554,048

Filed: October 24, 2005

For: ARRANGEMENT FOR INSPECTING
OBJECTS, ESPECIALLY MASKS IN
MICROLITHOGRAPHY

:
:
:
:
:
:
:
:
:
:
:

Confirmation No. 8295

TC/Art Unit: 2884

Examiner: Fani Polyzos Boosalis

Atty Docket: P70853US0

ATTACHMENT B

Semiconductor Technology

Radiation Sources for the EUV Lithography

Lithography with extreme ultraviolet light is foreseen to take the optical lithography forward in 2007.

Uwe Stamm, Heinrich Schwoerer and Rainer Lebert

Lithography with extreme ultraviolet (EUV) radiation with a wavelength of 13 nm is, according to the “Roadmap” of semiconductor manufacturers, the technology of choice for chip production starting in 2007. This technology jump requires not only optics and masks with a precision in the sub-nanometer range but also extremely performance-capable EUV radiation sources. Laser and discharge-created plasma are for this the most promising candidates.

Since 1959 the semiconductor industry has been on a course of miniaturization and speed. The result: A modern PC today has the computation power of a system of the size of a room in 1980. In the past the number of transistors per chip always doubled itself within one to one and a half years—a trend which the future INTEL co-founder Gordon Moore already recognized in 1965 and which still rules the semiconductor industry as Moore’s Law. And the chip manufacturers also plan to follow this law for the next 10–15 years.

Even today, only a few thousand electrons define the switch status of a bit and just as few atoms are present within the boundary layer of a transistor. In the leading laboratories of the world already transistors with structures of only 10 nanometer size are being operated which function as their “big brother.”

For creation of ultra fine structures in the factories today photo-lithographic processes are used. With this, resolutions are possible which are in the range of those of classical microscopes. The physical boundaries of miniaturization are thus already to be seen, but have not yet been definitively reached. Because photolithography is an optical process, the reachable lateral resolution Δx depends according to the Abbéschen Formula on the light wavelength λ and the numeric aperture NA :

$$\Delta x = k \cdot \lambda / NA,$$

In the semiconductor lithography all three ways are being followed in parallel to create smaller and smaller structures photo-lithographically:

- to reduce the so-called k factor,

- to reduce the wavelength of light used for reproduction,
- to increase the numeric aperture.

[See source for picture]

Fig. 1:

The light of the future? Chip structures which are smaller than 50 nm, will in the future be manufactured with extreme ultra-violet radiation. It can be created, e.g., in a ray of fluid xenon which goes into the plasma state through a strong laser. (Photo: XTREME technologies)

The classic resolution criterion is given through $k \approx 1$, i.e., the intensity must fall to practically zero between two objects to be resolved. Since the late 80’s, however, photo-resists were developed, whose characteristic line is so steep that a reproduction is taken as “sharp” if the intensity between two objects to be resolved falls only about less 10%. With this today k factors of under 0.4 are reachable, and in the future even a values of about 0.3 are thought to be possible.

As a light source for the lithography mercury vapor flames (Hg i-line at 365 nm) were used up to the nineties. Since the middle of the 90’s UV lasers at 248 nm were used and presently the 193-nm excimer laser lithography has been introduced in the chip production of structure widths of 100 nm. The excimer laser-based technology has today a share of about 80% in the lithography market. In 2005 the 157 nm technology should follow.

At last, the latest lithography lenses with complex aspherical optics of highest precision reach NA values of up to 0.85.

[lower right column]

Dr. Uwe Stamm, XTREME technologies GmbH,
Hans Böckler-Str. 27, 37079 Göttingen

Dr. Heinrich Schwoerer, Institute for Optics and
Quantum Electronics, Friedrich Schiller University,
Jena, Max-Wien Place 1, 07743 Jena

Dr. Rainer Lebert, AIXUV GmbH, Steinbachstraße
15, 52074 Aachen

Today all this points to that with numeric apertures of 0.9, k -factors of 0.35 and wavelengths of 157 nm and the minimum structure widths of 70–50 nm which can be created with them, the limits of excimer laser-based, light optical concepts have been reached. To create still smaller structures completely new lithography techniques must be developed, which work with substantially shorter wavelengths. Because of this in the past different technologies such as Röntgen, electron-rays and ion-rays were investigated world-wide, which, however, are not all fully suitable for mass production of integrated circuits. With the Röntgen lithography the unsolvable problem comes up in the manufacturing of the masks. Ion- and electron-rays have, because of their charge, strong Coulomb interactions at high currents and are because of this limited in the reachable combinations of resolution and productivity. At present only the electron-ray lithography for the production of integrated circuits starting from 2007—with limited productivity—is being developed. Ion-ray and Röntgen lithography have vanished from the roadmaps of the semiconductor industry.

[see source for figure]

Fig. 2:

Schematic of an EUV Scanner. The EUV radiation is coupled to the actual scanner through a collector optics. There it reproduces the reflective mask on the wafer also through reflective optical elements.

EUV-Strahlung = EUV Radiation

Kollektoroptyk = Collector optics

Optik-Box = Optics Box

Maskenstation = Mask Station

Waferstation = Wafer Station

Requirements of EUV Lithography

For future manufacturing of integrated circuits with critical dimensions (“nodes”) of 50 nm and less, the Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) is the very promising approach in view of international experts [1]. The intended EUV radiation for the excitation of the wafer (sometimes also-called XUV) lies in the spectral range between ultraviolet and soft Röntgen radiation (about 1 nm to 100 nm wavelength). For the lithography the work is concentrated on the range around 13.5 nm, because only here efficient optics for the required excitation systems can be manufactured.

The technical requirements for the EUVL are enormous: For one, the decided dimensions of 50 nm or less place immense requirements on the mechanical-optical layout and stability of the EUV radiator (scanner) (fig. 2). In the EUV Scanner mask

and wafer must be positioned accurate to nanometers at process speeds of mask and wafer recording in the range of 0.5 to 2.0 m/s. One imagines: An ICE should follow its pre-given travel path exactly to 0.2 mm at a speed of 200 km/h!

For another, the EUV radiation—as different from the UV radiation—is absorbed very strongly in nearly all material. Thus the absorption length in air lies well under a millimeter at normal pressure. With this EUV radiation can propagate nearly loss-free only in vacuum over the distances necessary for the EUVL (in the experimental difficulties bound with it lies the reason, in the end, for the somewhat step-motherly treatment of the EUV spectroscopy in the last fifty years). For EUVL from the high absorption follows a restructuring of the lithography technology full of consequences: the complete radiation path (i.e., the optics, masks, wafer and scanning stages in the EUV scanner) must be in UHV.

Still it is not sufficient: Because of the strong absorption, optical elements which are based on transmission to scan the masks or to reproduce on the wafer are also no more of use. For this now reflective optics, that is mirrors, must be used. Similarly the mask itself is reflective and no longer transmissive, as different from today’s lithography. The requirements on the upper surface evenness and form trueness increase with it enormously. A comparison: EUV mirrors in the scanner have a diameter of some 10 cm. If one takes the north-south expansion of Germany of about 1000 km, with the same requirement of evenness the highest mountain must not have the height of head of a chain, but must be less than 0.5 cm high.

[Bottom of page 34]

Requirements of the EUV Lithography Sources

Radiation Performance

With the probably achievable sensitivity of the EUV Resists as well as substantial losses in the scanner system of the mask and in the reproduction system of the mask on the wafer, at input of the EUV scanner an average EUV performance of 80–120 W will be required in the middle focus [4]. A collector optics between plasma and scanner will build the radiating plasma in this focus. If one considers the reflectivities and geometric-optical transmission of the collector optic elements it follows—for a performance of 80 W in the middle focus—a performance, emitted directly from the plasma, of 1111 W in a spatial angle of 2π ! This is nearly twice the size order of laser performance used in the Excimer laser lithography.

Emitting Source Size

From the optical properties of the EUV scanning system the requirements of the source size and divergence of the radiation follow directly. The defining size is the so-called *Étendue*, the product of the surface of the scanning spot and the square of the numeric aperture

$$E = A_{\text{eff}} \pi (\text{NA})^2$$

which is constant for the optical system. From the conceptualized size of the scanning spot of 2 x 20 mm and the numeric aperture of the reproduction lens of 0.25, only light from the source can be used which corresponds to an *Étendue* of 1–2 mm² sr. With the opening angles of the collector optics in question, for the source of about 2 sr the optical system of the EUV scanner can take over only radiation from a source volume with a diameter of about 1 mm. In this tiny volume the full performance of more than 1000 W in 2π sr must be created!

Spatial and Time Stability of the Emission

To be able to create reproducible structures in the region of 50 nm and less, the rate of the EUV scanner must be held constant at about 0.1%. This gives the required energy stability of the pulse emission in the captured space angle to about 1% standard deviation. The spatial position of the emitting plasma must be stable to about 0.1 mm.

Life Duration of Optics

As the life duration of the EUV scanner optics one year (3000 operational hours) for the first collector optics (see fig. 2) or 10 years (30,000 operational hours) for further scanner optics are required today. Above all because of the debris one is still more than three orders of magnitude away from a life duration of one year.

The necessary use of reflective optics more or less fixes the usable wavelength of the EUV lithography: high reflectivity of mirrors under nearly vertical incidence in the EUV can only be reached at present with dielectric mirrors of multiple layers (multilayer mirror) and also for only the wavelengths around 11 nm and around 13.5 nm. Mirrors for the spectral range around 11 nm can be manufactured from alternating beryllium and silicon layers. However, beryllium cannot be foreseen to be used for reasons of danger to health. Thus, as a second technical approach, layer systems of molybdenum and silicon with a reflection maximum around 13.5 nm remain. For the mass production one goes with a reflectivity of the individual mirror of “only” 65%—also when with record experiments somewhat above 70% is reachable. Because the optics in the EUV Scanner will be made from 12 or more such mirrors, in the wafer stage alone because of the reflectivity only about $5.6 \cdot 10^{-3}$ of the EUV performance arrives, which enters the scanner optics.

Because of this for the EUV lithography strong performance radiation sources are required, which compensate the losses in the optics. Which sources come in question for this? A laser in the soft Röntgen range would be obvious. An efficient, reliable Röntgen laser is, however, despite a variety of efforts, not in sight.

The use of the emission of relativistic electron-rays in accelerators (e.g., Speicherring BESSY II) seems just as obvious. However, the radiation power of the classical systems is too small, so that only the Free Electron Laser for 13 nm can fulfill the requirements [2]. These are, however, too unhandy and inflexible to be interfaced in the manufacturing philosophy of the semiconductor industry in particular with the addressed performance requirements.

The third and today the most favorite possibility for EUV radiation sources is, for many years, known from the laboratory: the creation of hot plasma which emits the radiation up to the Röntgen range. Here one can excite the plasma either through an electric discharge or through intensive laser rays. The emission of hot plasma can be estimated through blackbody radiation. If the radiation maximum is at about 13 nm, the plasma must be about 220 000 K (20 eV) hot. This plasma temperature is possible to reach through electrical as well as laser excitation of material.

The necessary productivity of the EUV lithography scanner is determined by the chip production representative costs for the scanning of a wafer, which in turn depend on the costs of

acquisition and operation of a complete scanning system, the costs for the masks as well as the required process steps. According to analyses of SEMATECH International the expected acquisition costs of an EUV lithography scanner for manufacturing of 50 nm structures are US\$ 34 million [3]. With it a throughput in the scanner of minimum 100 wafers per hour is necessary.

The requirements resulting from it on plasma-based radiation sources can be summarized in short as follows (cf. box “Requirements...”): The EUV source must emit as high radiation as possible in the spectral range and space angles usable by the optics. Along with this smallest possible electro-magnetic radiation of other wavelengths and the so-called debris should be emitted. Debris is understood to mean each form of particles from the source volume, which contribute to a degradation of the mirror layers—either through creation of thin, absorbing layers or through processes similar to ion radiations. Examples for debris are target or electrode broken pieces, vaporized material, or electrons, ions and atoms emitted from the plasma. To create as little debris as possible in plasma-based EUV sources often xenon is used as an efficient and small-in-contamination emitter at 13.5 nm. In the end the life duration of decaying parts should at least be comparable to that of Excimer laser lithography sources.

Each of the requirements in itself presents an immense technical challenge for the development of the EUV sources. To fulfill all the requirements and to implement the parameters in big industrial machines appears almost impossible. And still the first successes in the development of EUV sources gives support for the goal being achieved with EUV-emitting plasma which can be excited electrically through a gas discharge as well as also through an intensive laser ray. Both ways are being followed in the development of EUV sources and are discussed in the following.

Gas Discharge-Excited Plasmas

The most well known form of plasma creation is the electrical discharge through a gas, e.g., as spark or lightening. This most direct form of conversion of electrical energy into radiation is often also the most effective—proof for this is the high working grade of discharge lamps, in which a plasma radiates in a compact but cold container. However, for emission of EUV radiation the densities and temperatures of conventional gas discharge plasma are not sufficient. A cold and thin discharge plasma can however be compressed with magnetic fields to a hot and dense

plasma, whose emission maximum is around 13.5 nm. For this, one can use the self compression of a nearly cylindrical plasma through the azimuthal individual magnetic field of the axial discharge current itself (fig. 3). This process is characterized as the “pinch effect” and the resulting compressed plasma as pinch plasma.

From the Bennett-Relation (see information box “The Pinch Effect”) for the targeted plasma temperatures of $kT = 30$ eV, an average ionization of $\langle Z \rangle = 3$ for lithium to $\langle Z \rangle = 10$ for xenon as well as a plasma density of $4 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ the necessary current can be estimated at 18 to 30 kA. Its own magnetic field of 14–24 T compresses the plasma cylinder to a pressure of 2000 bar. The total energy in the magnetic field, plasma and conduction then comes to about 5 J, so that electrical connection performance of about 50 kW is required. A stable plasma cylinder of the required properties will have a resistance of about $50 \text{ m}\Omega$, so that the plasma would be heated with some 10^7 W ohmically. Through this the current already falls substantially after about 100 ns, so that the scheme is usable only in a pulsing discharge.

[see source for figure]

Fig. 3:

The individual magnetic field effects a radial force of $j \times B$ on a current carrying conductor, which radially compresses a plasma thread and heats (pinch effect).

Strom = Current

Stromdichte = Current Density

Magnetfeld = magnetic field

The sizes thus deduced are in principle already realized. In the framework of fusion research, pinch plasma are operated even with currents of several MA in a single pulse and thus magnetic fields of over 1000 T and plasma pressures of up to 10^7 bar are created. The technical problem of the EUVL sources development however consists in that the emission volumes can only be about 1 mm^3 size (cf. box "Requirements..."). The basic physical task is to make the individual discharge pulse in such a way that the conversion of discharge energy in EUV radiation is as much efficient as possible. In this the emission spectrum of the presently used xenon also still offers possibilities for optimization (fig. 4). The same is valid for other target materials: thus, e.g., the theoretical and experimental pre-investigations for tin promise conversion efficiencies up to $4\%/2\pi$ sr. Unfortunately tin as an emitter will anyhow worsen the critical debris problem even more substantially.

Whether it is possible to realize the necessary EUV performances of about 1000 W with gas discharge excited plasma also depends substantially on the reachable efficiency of cooling of the discharge system. Good conversion efficiencies are today at 1%, so that nearly the complete excitation performance must be cooled down. The technical solution approaches appear to make this possible. However, pinch plasma-based EUV sources show a further problem: The strong peak current load leads inevitably to the erosion of electrodes and limits the life duration of the discharge system. With this a contamination of the optics appears nearly inevitable. It is still not visible whether this problem can be removed through discharge and excitation geometries or contamination filters.

[See source for figure]

Fig. 4:

Only a small fractional part (orange) of the EUV-emitted performance from xenon can be used by the EUV optics.

Spektrale Intensität = Spectral Intensity
Wellenlänge in nm = Wavelength in nm

¹⁾ It still remains to be clarified, with the required radiation performance of over 10 kW, how the erosion and heating of the target is taken care of in the end.

²⁾ With table-top laser systems (with intensities of some $I_L = 10^{19} \text{ W/cm}^2$) today electron temperatures of over 1 MeV can be created.

Laser-Excited Plasma

To avoid the risk of performance limitation and in particular the problem of life duration of source and optics with gas discharge plasmas, today alternatively laser-produced plasmas are being investigated and developed as EUV sources for the lithography. Here at least the heat can be comparably easily removed. Also, no electrodes can erode because none are used.¹⁾

With the creation of EUV radiation through a laser excitation of plasmas, preferably a pulsed laser ray is focused on a target (fig. 5). If the reached light intensities I are above 10^{10} – 10^{11} W/cm^2 , the material is ionized. The field of a short, intensive laser pulse accelerates the free electrons of the plasma to high energies. The average kinetic energy U_{osz} of the electrons oscillating in the light field is

$$U_{\text{osz}} = e^2 E_0^2 / (m_e \omega^2),$$

where $E_0 = (2I/c\epsilon_0)^{1/2}$ the electric field strength, e is the elementary charge, ϵ_0 is the dielectric constant, m_e is the mass of the electron and ω is the frequency of the light.

The plasma built by the forefront of the laser pulse or from small front pulses expands and builds a density gradient before the material so that the main portion of the laser pulse comes in interaction with plasma and not with the original solid body. In particular the light can enter only up to the so-called critical plasma density $n_{\text{crit}} = \omega^2 m_e \epsilon_0 / e^2$ —at which the light frequency is the same as plasma frequency; at higher densities the breaking number will be imaginary and the light will be reflected.

Through collisions with the plasma ions the electrons heat the plasma to an equilibrium temperature T_L . For a laser wavelength of $\lambda = 800 \text{ nm}$ and a target with small to medium Z , $T_L = 10^4$ – 10^5 K (1–10 eV) at $I_L = 10^{13} \text{ W/cm}^2$ or about 10^7 K (1 keV) at $I_L = 10^{16} \text{ W/cm}^2$. As with gas discharge plasmas the temperature of the plasma now determines the origin and with that also the wavelength of the dominant radiation: At temperatures of some eV to some 100 eV the plasma ions emit line radiation.²⁾ This is the source of the light to be used for the EUV lithography.

[see source for figure]

Fig. 5:

Experimental setup for measuring the conversion efficiency of laser radiation in EUV radiation. An intensive laser pulse creates a hot plasma on the surface of the water drops. A calibrated, reproducing spectrometer detects the emitted EUV radiation.

Tröpfchenstrahl = Ray of drops
Laserpuls = Laser Pulse

torischer Spiegel = Toric Mirror
 Transmissionsgitterspektrometer = Transmission
 Grid Spectrometer

[lower left]

The Pinch Effect

The actual discoverer, Williard H. Bennett (1903–1987) described the pinch effect as magnetic self-focusing in a current-carrying plasma [5] and estimated the reachable plasma temperature through an equilibrium condition between the magnetic field pressure and the thermal plasma pressure:

$$B^2/2\mu_0 = (\langle Z \rangle + 1) \cdot n_i \cdot kT$$

where $\langle Z \rangle = n_e/n_i$ is the average ionization (ionization degree), n_i is the ionization density and kT is the plasma temperature. With the individual magnetic field $B = \mu_0 I / (2\pi r)$ of the gas discharge current I and the line density $N_i = n_i \pi r^2$ it follows

$$kT = \mu_0 I^2 / 8 \cdot \pi \cdot (\langle Z \rangle + 1) \cdot N_i$$

Plasmas with similar temperatures will be created if one adjusts discharge current and line density to each other (similarity parameter: I^2/N_i). The length and the diameter of the emitting plasma as well as the line density itself determine the size of the system (pulse energy) and the plasma density. The discharge geometry is determined through the similarity parameter of the discharge physics $U/(2rn_0)$, where n_0 is the neutral gas density before the discharge.

So: problem solved? Unfortunately not. The physical-technical difficulty of the laser-produced plasma as a source of EUV radiation for the lithography lies grounded in the laser itself. The conversion efficiency of the laser light in EUV radiation is comparable with the gas discharge-based sources. However according to present knowledge for the EUVL average performances of pulse laser up to some 10 kW is necessary. Such lasers do not exist—the highest performance pulse laser which is presently developed as a prototype and comes in question for EUVL has an average performance of 2.7 kW. However the development of the required high performance laser appears possible—with a decisive disadvantage for the chip production: they will be expensive, big and very complicated. If one goes by the semiconductor industry because of this also gas discharge-based EUV sources will come in use—however the technical risks are still not resolved.

To demonstrate how far the development is five years before the introduction in production, in the following the experimentally reached status of gas discharge and laser created plasma EUV sources is described.

Gas Discharge Plasma – State of the Art

All the discharge sources being investigated at present use the pinch effect, but differentiate themselves substantially in the ignition of discharge, which influences the stability of the EUV emission, in the geometry of the discharge chamber and with that in the plasma dynamics as well as regarding the used pulse current generators. We limit ourselves here to two geometries: the Z-Pinch (fig. 6a) [6] and the Hollow Cathode Triggered Pinch (HCT, fig. 6b) [7], with which German companies (XTREME technologies, PHILIPS Extreme UV und AIXUV) are leading the development.

[see source for figure]

Fig. 6:

- a) With the Z-Pinch arrangement the gas discharge is driven through a pulse-forming voltage generator. The actual discharge builds itself between the cathode and the anode, in part along the isolator between both the electrodes whereby the efficiency, homogeneity, and reproducibility is achieved through the UV radiation from a high efficient surface pre-ionization discharge.

Oberflächenentladung = Discharge surface
Entladungs-Vorrichtung = Discharge device

Vorionisierungsvorrichtung = Pre-ionization device

Kathode = Cathode

Anode = Anode

Isolator = Isolator

Schnittstelle zur Anwendungs- und Pumpvorrichtung = Interface to application and pumping device

- b) Also with an HCT Pinch the actual discharge takes place between the cathode and the anode. However the discharge does not ignite on the surface of the isolator but between the hollow cathode and the hollow anode.

Trigger-Vorrichtung = Trigger device

Hohlkathoden-Entladung = Hollow cathode discharge

Kathode = Cathode

Anode = Anode

Schnittstelle zur Anwendungs- und Pumpvorrichtung = Interface to application and pumping device

As estimated above, the systems are operated with typical discharge energies of 2 to 30 J per pulse so that maximum currents of 20 to 50 kA are reached. Both concepts allow principally to use large space angles of up to 2 sr of the source emission and to excite small plasma volume.

What has been achieved? With Z-Pinch it has been possible to reach a maximum emitted performance of about 40 W (fig. 7); this corresponds to a performance of 5 W in the middle focus [8]. This is still only somewhat more than a size order under the required performance for EUVL production. The size of the emission area in this is about 1 mm diameter, i.e., the full emitted performance can also actually be taken over through the optical system of the EUV scanner.

[see source for figure]

Fig. 7:

Reached average output performance for a Z-Pinch EUV source in the laboratory of XTREME technologies (Göttingen), emitted in 2π sr space angle (orange dots) or 1 sr (blue dots).

EUV Leistung in W = EUV Performance in W

Wiederholungsrate in Hz = Repetition Rate in Hz

The most significant characteristic parameter to reach the required performance is the conversion efficiency. The highest efficiencies were reached up to now with up to 0.09% in 1 sr space angle and 2% bandwidth, this corresponds to about 0.55% conversion in 2π sr [8].³⁾ It is encouraging that the

reached values are near to the roughly estimated values; however, there are still factors which promise a further increase.

The way to higher output performance leads with pre-given conversion efficiency naturally over the progression frequency. In short pulse trains it became possible to operate discharge plasmas up to now with repetition rates of up to 6 kHz. Over a longer time duration both with HCT- as well as with the Z-Pinch repetition rates of some kHz are possible. Here, besides the time stability, particularly the spatial stability of the EUV emission area is of importance. (The deviations of the EUV emission area of a Z-Pinch plasma determined with over 200 impulses are today at about 5%—already sufficient for the EUVL production.)

The reachable output performance as well as the final optics life duration caused by the debris must be further increased up to production-mature lithography with gas discharge-based EUV sources. Both can still become the “Showstopper”!

³⁾ This conversion efficiency follows from the ratio of emitted EUV power to input power in the electrical excitation circuit.

Laser-Produced Plasmas – State of the Art

Because of the smaller anticipated problems with cooling and the assumed smaller debris creation laser-induced plasmas were favored for several years as EUV sources for the lithography and were developed in the framework of an American Consortium. One of the sources developed at the Sandia National Laboratories delivered usable EUV output performance at 13.5 nm of about 2 W in the middle focus [9].

In most investigations for laser-created EUV radiation well switched Nd:YAG lasers were used, with pulse energies of some 10 mJ up to some 100 mJ and impulse durations of between 1 and 15 ns. With the use of xenon targets the conversion efficiencies were also at 0.5–1% [10]. A laser with XTREME technologies with 230 W average performance delivers 0.7 W EUV radiation.

With laser induced plasmas the debris creation can be minimized, if all the material is converted into a plasma, that is, a small, laser pulse energy-adjusted volume is focused with laser. Such mass-limited targets can be either liquid rays, small drops or atomic cluster. Up to now the reached conversion efficiencies are still substantially lower than the values for solid targets.

To get the highest efficiencies at the present time from mass-limited targets as in the case of xenon up to nearly 1% in 2π sr, the laser excitation must be determined carefully by the type and size of the target. The energy of the laser pulse should excite as far as possible all material in the desired ionization state and heat the created plasma to a temperature of 20–30 eV. In this case, analogous to the gas discharge plasmas, the black body radiation is maximally 13.5 nm. Higher laser pulse energies will heat the material unnecessarily and reduce the efficiency, smaller will not excite all the atoms in the desired ionization state and thus for emission.

To possibly create still more efficient EUV radiation—and thus to reduce the size of the needed laser driver—one follows different approaches. For one, it is being tried to adjust the excitation duration optimally to the dynamics of the plasma. Because the excitation duration depends on the expansion dynamics of the plasma and its absorption is influenced strongly by its density: with solid body density a large portion of the radiation is reflected at the surface. Most of the light is absorbed in the areas with the critical density for the laser wavelength, at still smaller densities the absorption falls steeply again, the laser pulse passes through the thin material without heating it. Experiments with small water drops show that laser pulse durations around 1 ns get highest conversion efficiencies [11].

For another, the use of two short laser pulses, applied one following another, promises an increase of the conversion efficiency. The task of the first, typically weaker pulse is to create a plasma of the density of maximum absorption, which is then heated optimally by the time delayed strong pulse. In this way at Friedrich Schiller University in Jena conversion efficiencies near 0.5% in 2π sr in 0.1% bandwidth were reached. However for this laser pulse

durations of few ps from a Ti:Saphir laser were necessary, which can not be created by the present industrially preferred Nd:YAG lasers (fig. 8).

Many of the systematic experiments up to now regarding laser-created EUV radiation were done on water drops, with which on the one hand a high conversion efficiency within a very narrowband line was reached and which on the other hand are simple, cheap and easy to make continuously ready. For industrial purposes, however, at present xenon is preferred for a variety of reasons. xenon can not be formed in reproducible drops under UHV conditions because of its surface tension. For this either sprays, atomic clusters or liquid rays are used. From such xenon clusters and jets, as work at Max Born Institute in Berlin and at XTREME technologies in Jena shows, also efficiencies around 0.5% are achieved. To achieve the highest possible plasma densities fluid or frozen xenon rays, besides alternative materials, are the most probable approaches which promise success.

Regarding the targeted EUV output performance laser-induced plasmas remain today clearly behind the gas discharge plasmas. A reason for this is above all the complexity of the laser. It is still far more simple to build a pulsed 10-kW high voltage supply in place of a 10-kW laser! And also the assumed small debris and with that the increased life duration of the optics exists up to now only on paper. However the main advantages of the laser plasma remain regarding efficient cooling. The further progress is eagerly awaited. Because in 2004 the question for the EUV lithography source must be decided: laser plasma or gas discharge plasma?

EUVL for the Industrial Use

If everything goes as the experts from the semiconductor industry predict, the EUV Lithography will be used in production of computer chips in a big way starting in 2007. The number of needed EUV sources for the scanner will already reach about 100 pieces in 2007 worldwide with an estimated turnover potential of €200–700 million, each according to the source technology. The complete turnover of the worldwide newly installed EUV scanners is foreseen to be €3.5 billion in 2007—with increasing tendency.

[see source for figure]

Fig. 8:

A laser pulse pair meets with 1 MHz repetition exactly one drop of a water drop chain and changes it in a radiating plasma. The EUV energy radiated by

one single drop in these experiments is only few hundred microjoules. To achieve an average performance of nearly 1 kW necessary for industrial application, the volume of the water drops and with that the number of emitters per laser shot must be increased and the repetition rate of the laser should be more than 10 kHz.

[left column]

BMBF Project for EUV Lithography German Companies and Institutes (without Representatives):

- XTREME technologies GmbH
- Philips Extreme UV GmbH
- Jenoptik Mikrotechnik GmbH
- SCHOTT Glas
- Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing Technologies AG
- Schott Lithotec AG
- Roth & Rau Oberflächentechnik AG
- AIS Automation Dresden GmbH
- Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Leipzig
- Infineon Technologies AG
- Institut für Mikroelektronik Stuttgart
- Leica Microsystems Semiconductor GmbH
- Clariant GmbH

To be primed in Europe for the 13.5 nm competition, comprehensive research and development plans are being carried out at European and national level. While in the 90's feasibility studies for EUVL were done above all in the USA (with participation of European users from the semiconductor industry and machine manufacturers) and Japan, at the end of 90's stronger attempts were made in Europe to carry out independent research and development programs.

In preparation for comprehensive EUV research activities the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) has commissioned a national initiative with high priority in the year 2000, in which according to preset goals from German industry basic questions regarding concepts and limitations of creating EUV radiation will be investigated by different research institutes. Since 2001 BMBF with about €50 million supports the federal project "Extreme Ultraviolet Lithography" (see box). In this, companies from Netherlands, Belgium, France, Sweden and Germany are cooperating in the framework of a EUREKA initiative; the support is planned for five years. Through this boundaries-overlapping project the position of the European suppliers of the semiconductor industry will be strengthened.

Included are the German research and development activities in an overall European development project regarding EUV sources in the framework of the program MEDEA+ (Micro-Electronic Development for European Applications), which concerns itself with a capacity of about 2400 man years with the development of the EUV lithography. The present EUV program in MEDEA+ has the goal of development of a complete solution for the first generation of EUV scanners. The project for EUV source development is being led by XTREME technologies.

As according to international estimation in the implementation of EUVL the radiation sources before the masks present the biggest risk, it is sensible to undertake comprehensive initiatives to limit and overcome this risk—what is also recognized in the particular observation of this question through the BMBF. In Japan in April 2002 a program with a budget of US\$ 10 million per year for the source development (duration four years) was started under the name EUVA.

In the meantime Germany has taken a technologically advanced position in the development of EUV sources. In the years 2000/01 three new companies were founded, which concern themselves with the development and production of EUV sources: the AIXUV GmbH, a subsidiary of the

Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT) and the RWTH in Aachen, the Philips Extreme UV GmbH, a joint Venture between Philips and the ILT, and the XTREME technologies GmbH, a joint venture between the Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH, Jena and the Lambda Physik AG, Göttingen.

And the progress can be seen: AIXUV commercialized sources of low performance for research in EUVL components and has in October 2002 delivered the first EUV scanner worldwide to Infineon; at XTREME technologies in middle 2002 it became possible to realize Z-Pinch Plasma EUV sources with the highest available EUV performance worldwide up to now of over 40 W (in about 2π sr at 2 kHz). This is about five times as much as the performance created by the laser-induced plasma EUV sources at American EUV LLC (Sandia National Laboratories). Moreover XTREME technologies does further research and development work in the area of laser-induced plasma. Philips Extreme UV can get today EUV performances of 5 W with a collector from an HCT-pinch plasma at repetition rates of more than 3 kHz and operate the system over many minutes. The German EUV sources are leading the race. At midpoint.

There is still a long way to go from the 40 W EUV performances today up to the 1000 W performance for the chip production. But the first battles have been won.

Literature

- [1] Proc. CD of SEMATECH International 5th NGL Workshop, Pasadena, USA (2001)
- [2] G. Dattoli et al., Nucl. Instr. Meth. A474/3, 259 (2001)
- [3] P. Seidel et al., Proceedings CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [4] V. Banine et al., Proc. CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [5] W. H. Bennett, Phys. Rev. 45, 890 (1934)
- [6] G. Schriever et al., Microelec. Eng. 61-62, 83 (2002)
- [7] R. Lebert et al., Microelec. Eng. 46, 465 (1999)
- [8] U. Stamm et al., Proc. CD of 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Dallas, 14-17 October 2002, Dallas, TX, USA
- [9] D. A. Tichenor et al., Proceedings of the SPIE 4688, 72 (2002)

- [10] *U. Stamm* et al., Proc. of the SPIE **4688**,
122 (2002)
[11] *S. Düsterer* et al., Appl. Opt. B Vol. **73**, 693
(2001)

The Authors

[see source for pictures]

Uwe Stamm studied physics in Jena and received his doctorate in 1986 at the Friedrich Schiller University. Then he worked there—interrupted by research stay in Moscow and Tokyo—as scientific assistant. From 1991 to 2000 he was working at the Lambda Physics AG. With the founding of XTREME technologies GmbH Stamm took over its business leadership in 2001. He is engaged in various committees and work circles of, among others, MEDEA+, VDI and BMBF.

Rainer Lebert received his physics degree at the TH Darmstadt in 1984. He received his doctorate in 1990 at the RWTH Aachen and contributed there substantially to realization of radiation sources for the Röntgen microscopy and lithography. From 1994 to 2000 he led the AG “Plasma Technology” as lecturer for laser technology. In 2000 Lebert founded AIXUV GmbH with colleagues of the Fraunhofer ILT which he has led since then as President.

Heinrich Schwoerer studied physics in Heidelberg. He received his doctorate in 1994 at the ETH Zurich. Thereafter he worked at the Institute for Physical Chemistry of the Würzburg University. Since 1999 he has led the High Intensity Laser Laboratory at the Institute for Optics and Quantum Electronics of the Jena University. He is engaged with the creation and application of laser-produced plasma and has built one of the most intensive lasers for this purpose worldwide.